

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUIMCIAS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

“OPTIMIZACION DE LA OBTENCION DEL HORMIGON SECO  
A PARTIR DEL DISEÑO EXPERIMENTAL 2<sup>K</sup>”

TESIS PREVIA A LA  
OBTENCION DEL  
TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO

AUTORES: JESSENIA ESTEFANIA JERVES LEMA  
FLAVIO EUCLIDES MOROCHO GUAMÁN

DIRECTOR: ING JUAN JOSE VAZQUEZ GUILLEN MGT.

CUENCA – ECUADOR

2015



## RESUMEN DE TESIS

### “OPTIMIZACIÓN DE LA OBTENCIÓN DEL HORMIGÓN SECO A PARTIR DE DISEÑO EXPERIMENTAL 2K”

La industria del Hormigón ha tenido cambios importantes y significativos a través del tiempo; es así que en la actualidad el Hormigón o concreto cuyas características de resistencia, versatilidad, durabilidad y economía llega a ser el material más utilizado en todo el mundo y por ello se encuentra en una sociedad más exigente y con mayor demanda. Esta situación en presencia de la globalización y el crecimiento de industrias hormigoneras extranjeras, lleva a que la fábrica “Hormicreto” decida abrir sus puertas a gente joven, emprendedora, con buenas ideas y propuestas para la generación de productos que sean de utilidad para las personas.

Para llevar a cabo el desarrollo del Hormigón Seco se propone esta investigación, cuyo fin es Optimizar la producción del Hormigón con la ayuda del diseño experimental 2<sup>K</sup>, con las características deseadas, y con él realizar una optimización del producto con la materia prima que dispone la empresa.

El desarrollo de este producto se resume en 6 capítulos. El primero relata una investigación de la Industria, definición, materias primas y características del Hormigón. En el segundo, se estudian los métodos y requisitos de cómo se puede obtener este producto, y de acuerdo a ello, se selecciona el más adecuado para nuestro estudio. El tercer capítulo, se basa en el diseño experimental, que nos dará una guía para realizar la parte experimental. De inmediato, vamos a realizar todo el análisis de varianza ANOVA de resultados para aceptarlos como confiables o descartarlos, tomando decisiones para la optimización del producto siguiendo el mismo lineamiento de la obtención del Hormigón Seco. Finalmente en el capítulo 6 se van a desarrollar las conclusiones y recomendaciones tanto de la producción como de la optimización.

Así, esta investigación es obtener y optimizar el producto de Hormigón Seco para que la empresa Hormicreto pueda incorporarlo en el mercado local y luego nacional.

**Palabras claves:** Hormigón, Asentamiento, Resistencia, Cono de Abrams, ANOVA, Experimentos, Factorial, Varianza.



## ABSTRACT

### "OPTIMIZATION OF PROCUREMENT OF DRY CONCRETE EXPERIMENTAL DESIGN FROM 2K"

Concrete industry has had important and significant changes over time; so that at present the concrete with characteristics of strength, versatility, durability and economy become the most used material worldwide and therefore is in a more demanding and more demand society. This situation in the face of globalization and the growth of foreign concrete industries, leading to the factory "Hormicroto" decides to open its doors to young people, enterprising, with good ideas and proposals for the generation of products that are useful for people .

To carry out the development of this research Dry Concrete is proposed, which aims to optimize the production of concrete with the help of experimental design 2K, with the desired characteristics, and with him an optimization of the product with the raw material available to the company.

The development of this product is summarized in six chapters. The first relates an industry research, definition, raw materials and characteristics of the concrete. In the second, the methods and requirements of how to get this product are studied, and accordingly, it selects the most appropriate for our study. The third chapter is based on experimental design, which will give us a guide for the experimental part. Immediately, we will do all the ANOVA results to accept them as reliable or discard, making decisions to optimize the product following the same lines of production of dry concrete. Finally in Chapter 6 they are to develop the conclusions and recommendations of both the production and optimization.

As a result, this research is to obtain and optimize the product for Concrete Dry Hormicroto can incorporate the company in the local market and then national.

**Key words:** Concrete, Settlement, Strength, Abrams cone, ANOVA, Experiments, Factorial, Variance.



## INDICE

### AGRADECIMIENTO

### DEDICATORIAS

CAPITULO 1. ....	14
1. INDUSTRIA DE HORMIGON. GENERALIDADES. ....	14
1.1. BREVE RESEÑA DE LA INDUSTRIA DE HORMIGON. ....	14
1.2 DEFINICION DE HORMIGON .....	15
1.3 CURADO DEL HORMIGÓN .....	17
1.3.1 IMPORTANCIA DEL CURADO .....	17
1.3.1.1. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD .....	17
1.3.1.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA .....	18
1.4. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA FABRICACION DE HORMIGON. ....	18
1.4.1 CEMENTO PORTLAND .....	19
1.4.1.1 REQUISITOS QUIMICOS DEL CEMENTO PORTLAND .....	19
1.4.1.2 CLASIFICACION DE CEMENTO PORTLAND. ....	20
1.4.2 ARIDOS FINOS. ....	21
1.4.3 ARIDOS GRUESOS .....	24
1.4.4 AGUA .....	24
1.4.4.1 FUNCIONES DEL AGUA EN EL HORMIGÓN. ....	25
1.4.5 ADITIVOS .....	26
1.5 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA FÁBRICA HORMICRETO .....	27
CAPITULO 2. ....	28
METODOLOGÍAS PARA LA OBTENICIÓN DE HORMIGÓN SECO .....	28
2.1 INTRODUCCIÓN .....	28
2.2 MÉTODOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN .....	29
2.2.1. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN SEGÚN MEZCLA DE SUS COMPONENTES EN VOLUMEN, Y EN FUNCIÓN DE LA RIQUEZA DE CEMENTO QUE SE NECESITE POR M <sup>3</sup> .....	30
2.2.2 DOSIFICACIÓN POR PESO DE SUS COMPONENTES, PARTIENDO DE UNA CANTIDAD FIJADA DE CEMENTO POR M <sup>3</sup> .....	31



2.2.2.1 DOSIFICACION DE UN HORMIGON POR EL SISTEMA DE FULLER ....	32
2.2.2.2 DOSIFICACIÓN DE UN HORMIGÓN POR LA FÓRMULA DE BOLOMEY .....	35
2.2.3. MÉTODO BASADO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN .....	37
2.2.3.1 MÉTODO SEGÚN DE LA PEÑA .....	37
2.2.3.2 MÉTODO A.C.I. (AMERICAN CONCRET INSTITUTE) PARA HORMIGON CONVENCIONAL .....	42
2.2.3.2.1 TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO .....	46
2.2.3.2.2 MÉTODO DE CONO DE ABRAMS .....	47
CAPITULO 3. ....	49
TEORIA DE DISEÑO EXPERIMENTAL .....	49
3.1 DISEÑOS EXPERIMENTALES FACTORIALES .....	49
3.2. DEFINICIONES. ....	50
3.3. DISEÑOS “UNO A LA VEZ” .....	51
3.4. DISEÑO FACTORIAL $2^k$ .....	52
3.5. IMPORTANCIA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL: .....	53
3.6. CALIDAD DEL DISEÑO EXPERIMENTAL .....	53
3.7. VENTAJAS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL .....	54
3.8. ETAPAS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL: .....	55
3.8.1. ANALISIS DEL PROBLEMA .....	56
3.8.2. PLANIFICACION DE LOS EXPERIMENTOS .....	57
3.8.3. EJECUCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS .....	58
3.8.3.1. CONSTRUCCIÓN DE FRACCIONES $2K$ .....	58
3.8.4. TRATAMIENTO ESTADISTICO DE DATOS Y ANALISIS DE DATOS .....	59
3.8.4.1. PRUEBA ANOVA .....	59
3.9. PROCEDIMIENTO DE EXPERIMENTACION POR MEDIO DE UN DISEÑO FACTORIAL .....	60
3.10. JUSTIFICACION DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES QUE GOBERNARÁN ESTE SISTEMA. ....	61
3.10.1 Relación Agua/Cemento .....	61
3.10.2 Determinación de la cantidad de Agua .....	61
3.10.3 Determinación de la cantidad de Cemento .....	62
3.10.4 Determinación del Agregado Fino (Arena) .....	63



3.10.5 Determinación del Aditivo .....	63
CAPITULO 4. ....	65
4.1 EXPERIMENTACIÓN.....	65
4.2 TABLAS DE DATOS OBTENIDAS EN LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGON SECO25N/mm <sup>2</sup> .....	67
4.3. CUANTIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION.....	68
4.4. CUANTIFICACION DE LOS RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION .....	71
4.4.1. DETERMINACION DEL ASENTAMIENTO EN CADA DISEÑO.....	71
4.4.2. RESISTENCIA DE MADURACIÓN A LAS 28 DÍAS.....	71
4.5. RESULTADOS DE CADA EXPERIMENTO DEL HORMIGÓN SECO .....	72
4.5.1. REPRESENTACIÓN CUANTITATIVA DE LOS RESULTADOS.....	72
4.6. ANALISIS DE LA VARIANZA (ANOVA).....	74
4.6.1. CÁLCULO DE LA SUMA DE CUADRADOS .....	77
4.7. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS: .....	79
4.7.1. TABLA ANOVA EN EL ASENTAMIENTO:.....	80
4.7.2. TABLA ANOVA EN LA RESISTENCIA:.....	80
4.7.3. TABLA ANOVA DE RESULTADOS TOTALES .....	81
CAPITULO 5 .....	83
5.1 OPTIMIZACIÓN DE HORMIGÓN SECO.....	84
5.1.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CADA EXPERIMENTO.....	86
5.1.2 ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS: .....	88
CAPITULO 6 .....	92
6.1. CONCLUSIONES DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN SECO.....	92
6.2. CONCLUSIONES DE LA OPTIMIZACIÓN DE HORMIGÓN SECO.....	95
6.3. RECOMENDACIONES.....	97
Bibliografía .....	107



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

---



Universidad de Cuenca  
Clausula de propiedad intelectual

---

*Jessenia Estefania Jerves Lema*, autor de la tesis "Optimización de la Obtención del Hormigón Seco a partir del Diseño Experimental 2k", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, junio 24 del 2015

Jessenia Estefania Jerves Lema

C.I: 0105214985



Universidad de Cuenca  
Clausula de propiedad intelectual

---

*Flavio Euclides Morocho Guamán*, autor de la tesis "Optimización de la Obtención del Hormigón Seco a partir del Diseño Experimental 2k", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, junio 24 del 2015

Flavio Euclides Morocho Guamán

C.I: 0105724298





Universidad de Cuenca  
Clausula de derechos de autor

*Jessenia Estefania Jerves Lema*, autor de la tesis "Optimización de la Obtención del Hormigón Seco a partir del Diseño Experimental 2k", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Química. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, junio 24 del 2015

Jessenia Estefania Jerves Lema

C.I: 0105214985



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

---



Universidad de Cuenca  
Clausula de derechos de autor

---

*Flavio Euclides Morocho Guamán*, autor de la tesis "Optimización de la Obtención del Hormigón Seco a partir del Diseño Experimental 2k", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Químico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, junio 24 del 2015

Flavio Euclides Morocho Guamán

C.I: 0105724298



## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al ING. JUAN JOSÉ VAZQUES MGT., Director de esta monografía, que generosamente nos guió transmitiéndonos sus conocimientos y día a día estuvo pendiente de la realización de este estudio.

Al Ing. Paolo Tenezaca que nos abrió las puertas y nos brindó conocimiento y recomendaciones para desarrollar esta investigación en la empresa Hormicroto en la cual él desarrolla el cargo de Jefe la Laboratorio.



**DEDICATORIA**

**A mi bebito, Axelito Luna, que desde el cielo me dio fuerzas para levantarme día a día en medio de la tormenta, regresar y seguir adelante.**

**A mis padres y mi tía Carmen por su apoyo incondicional que me permitieron culminar con éxito mis estudios.**

**JESSENIA JERVES**



## DEDICATORIA

ESTA TESIS ESTA DEDICADA PRINCIPALMENTE A DIOS AL CUAL AGRADEZCO EL REGALARME UN DIA MAS PARA INTENTARLO NUEVAMENTE, CON EL FIRME PROPOSITO DE VIVIR BIEN Y EN EL CAMINO CONSEGUIR METAS QUE JUSTIFIQUEN EL HECHO DE EXISTIR. TAMBIEN A MI ABUELO QUE CON EL EJEMPLO ME SUPO GUIAR Y CON SUS CONSEJOS FORJO MIS ANELOS Y AMBICIONES, SIEMPRE CON LA PREMISA DEL RESPETO A LOS SERES VIVOS POR PEQUEÑOS QUE ESTOS SEAN ANTES QUE A CUALQUIER COSA.

AHORA UN RECUERDO TUYO, HACE MAS FIRME NUESTRO PACTO.

*FLAVIO MOROCHO*



## CAPITULO 1.

### 1. INDUSTRIA DE HORMIGON. GENERALIDADES.

#### 1.1. BREVE RESEÑA DE LA INDUSTRIA DE HORMIGON.

Probablemente la historia del hormigón es tan antigua como la propia humanidad. Su empleo se remonta a las épocas en que el hombre se vio en la necesidad de construir su propia habitación utilizando arcilla o una mezcla de cal y arena para mantener juntas las piedras o ladrillos de ésta.(1)

El hormigón, como se lo conoce hoy día, es el rey de los materiales de construcción constituido básicamente por rocas, de tamaño máximo limitado, que cumplen ciertas condiciones en cuanto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas, unidas por una pasta aglomerante formada por un conglomerante (cemento) y agua. Este material básico en el momento de su amasado, puede añadirsele otros productos o materiales para mejorar algunas características determinadas (2).

Este material permite conseguir piezas de cualquier forma por complicada que esta sea, esto debido al carácter plástico que posee cuando se encuentra en estado fresco. Por otra parte puede adquirir resistencias variables a compresión y aunque posea resistencias débiles a tracción permite aumentarlas apreciablemente valiéndose del acero al que puede incorporar en su seno, y en los lugares adecuados, dando lugar al hormigón armado y pretensado.

La ventaja que presenta el Hormigón sobre otros materiales resistentes, es el de poder proporcionar piezas y acabados con una facilidad de moldearlos. Desde el punto de vista, el Hormigón se comporta mejor en las construcciones de mamposterías y sillerías, que en las fábricas de ladrillo y en las estructuras de acero laminado.(2)



Ante las exigencias de la industria y su constante evolución a lo largo del tiempo el Hormigón ha ido perfeccionándose como consecuencia de la mejora experimentada tanto de los métodos de obtención como de las materias primas que lo componen y a su vez del avance tecnológico que da más facilidades y mejora procesos. (2)

El constructor aún en la actualidad recurre a la fundición con métodos que van en función del peso, pero este Hormigón en una obra no siempre cumple las características deseadas, debido a que en el lugar de la obra no siempre se cuenta con una balanza, lo cual la dosificación llega a ser un aproximado de la real, y esto hace que la dosificación o la cantidad de cada componente no sea el adecuado. Otro inconveniente es el hecho de recurrir a la compra de materia prima por separado (Cemento, agregado fino, agregado grueso, agua), y con ello se generen desperdicios de más de uno de los componentes, que significan pérdidas económicas y de tiempo.

Hoy en día el Hormigón Seco llega a ser una solución a estos problemas latentes para la sociedad y la industria de la construcción con un sin número de beneficios dando facilidad al constructor y satisfaciendo las necesidades de una correcta dosificación del mismo y pueda llegar a la resistencia especificada y al mismo tiempo se prepare la cantidad requerida del mismo, con el simple hecho de añadir la cantidad de agua descrita en su presentación y con una correcta homogenización, obtener un Hormigón listo para ponerlo en obra y sin complicaciones de ningún tipo.

## 1.2 DEFINICION DE HORMIGON

Al Hormigón se le considera como una roca compuesta, que resulta de la mezcla íntima de un conglomerante formado por cemento más agua y en el cual se le incorporan agregados finos y gruesos que le van a dar cuerpo.

Comúnmente la pasta de cemento constituye entre el 25 y 40% del volumen total del Hormigón o concreto. La figura N°1 que se muestra a

continuación muestra el proceso de formación del Hormigón Simple, con las características que debe poseer, que hacen que este producto sea importante.



Figura N° 1 Formación del Hormigón Simple

FUENTE: Manual de Concreto parte 1

ELABORACION: LOS AUTORES

Las características del Hormigón simple se resumen en:

- Puede tomar diferentes formas según el diseño que se plantee.
- Se deja colocar en obra cuando se encuentra como una masa más o menos plástica.
- Resiste a esfuerzos de compresión no de tracción.
- Posee buena durabilidad ante los ambientes en el que se trabaje.

Fundamentando lo anterior en el Hormigón o concreto existen dos tipos de estados que poseen propiedades definidas que dependen de características de las materias primas que lo integren, así como también de las proporciones de cada una de ellas, del proceso de mezclado, del cuidado en el transporte, colocación y consolidación y del curado en las primeras edades:

- El estado de Hormigón fresco.
- El estado de Hormigón endurecido.

La calidad de un buen concreto está incidida por múltiples factores y/o variables interrelacionadas entre sí, de tal manera que optimizar una o dos y descuidar las otras, trae como consecuencia una amplia variación en la calidad de la masa fresca o endurecida y por ende del comportamiento mecánico de la estructura en construcción. Es por ello que en este estudio se seleccionan cada una de las variables con un estudio previo para obtener el producto deseado.





## 1.3 CURADO DEL HORMIGÓN

El curado del Hormigón es el desarrollo potencial de resistencias y su durabilidad se produce gracias a la reacción química del agua con el cemento; por tanto es necesario proteger el hormigón durante el tiempo necesario para que adquiera las resistencias requeridas en condiciones de humedad y temperatura en un proceso continuo que se denomina curado

### 1.3.1 IMPORTANCIA DEL CURADO

El tratamiento posterior que debe tener el Hormigón es importante para llegar a la resistencia requerida, sabiendo que la reacción de hidratación es la que genera el endurecimiento de la mezcla y se debe procurar que tenga las condiciones óptimas para un buen resultado.

Durante el fraguado y primer período de endurecimiento, se asegura que el hormigón tenga las condiciones adecuadas de humedad y temperatura para su hidratación ya que si no son las adecuadas, esta se ralentiza pudiendo llegar a interrumpirse. Una de las causas que puede provocar la detención de la reacción de hidratación es la falta de agua libre, lo que conduce a una mayor porosidad, reflejándose en una menor resistencia.

Las propiedades mecánicas del hormigón dependen en una mayor medida de los cambios en la micro estructura de la pasta de cemento, que de la composición química de los productos hidratados. Por lo tanto, el volumen de poros capilares juega un papel importante en las propiedades mecánicas del hormigón.(6)

#### 1.3.1.1. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD

La Humedad del ambiente juega un papel importante en el proceso de curado del Hormigón, cuando éste se encuentra saturado con agua y en contacto con la atmósfera se produce una retracción debida al gradiente de humedades interior-exterior, el cual genera una pérdida de volumen en la estructura causada por una evaporación del agua de amasado en la superficie



del hormigón fresco, marcando así la importancia del curado. Al aumentar la humedad relativa del ambiente la retracción decrece.

Estos cambios volumétricos en la masa de hormigón, con el transcurso del tiempo pueden provocar tensiones de tracción originando fisuras y provocando una disminución de la resistencia a compresión del hormigón.

Por ende, la realización de un buen curado tiende a disminuir la pérdida de agua libre y por lo tanto a mejorar la calidad del hormigón.

### 1.3.1.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

La influencia de la temperatura en el proceso de curado es importante de acuerdo al lugar donde se encuentre, ya que cuando aumenta la temperatura de curado se produce una ligera tendencia a la disminución de la resistencia, además de la posibilidad de que se produzca microfisuración.

Por el otro lado, bajas temperaturas de curado provocan una reducción en la velocidad de la reacción de hidratación prolongando el tiempo de curado.

En esta investigación este parámetro no se la considera debido a que tanto la parte experimental como la distribución del producto se va a realizar en la ciudad de Cuenca y los cambios de temperatura no generan gran variabilidad en las características del Hormigón. La influencia la tendría si este producto se lo distribuiría en otra ciudad.

## 1.4. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA FABRICACION DE HORMIGON

El ciclo de vida del Hormigón empieza con la extracción de las materias primas, materiales requeridos que incluyen:

- Cemento (en un 12% de la composición del Hormigón).



- Los áridos finos (habitualmente en forma de arena, constituyendo aproximadamente un 34% de la composición del Hormigón).
- Áridos gruesos (en aproximadamente un 48% del Hormigón).
- Agua (esta está relacionada con la cantidad de cemento).

Mientras los dos tipos de agregados tanto el fino como el grueso consumen la mayor proporción de la mezcla de hormigón, el cemento es el ingrediente clave ya que hace posible la unión de los otros componentes.  
(3)

Para que un Hormigón Seco cumpla con los requerimientos especificados, las materias primas tienen necesariamente que ser normalizadas, para lo cual es importante la correcta adecuación y tratamiento que se le dé a cada una de estas, para que el Hormigón tenga una larga vida en el empaque y que los resultados en obra sean los deseados los áridos deben estar secos.

## 1.4.1 CEMENTO PORTLAND

El cemento portland es el conglomerante hidráulico, que resulta de la pulverización de Clinker frío, a un grado de finura determinado, al cual se le adiciona sulfato de calcio natural. Según el criterio del productor también puede incorporarse auxiliares modificadores de propiedades del cemento tal que no sean nocivos para el comportamiento posterior del producto, de acuerdo con lo especificado en la Norma de Aditivos para Proceso de Elaboración del Cemento Portland DGN C-133 vigente.(4)

### 1.4.1.1 REQUISITOS QUIMICOS DEL CEMENTO PORTLAND

Todos los cementos deben cumplir ciertos requisitos que son indispensables para que este cumpla con los requerimientos de calidad, y el resultado final del Hormigón sean los óptimos, estos requisitos se muestran en la tabla número N°1. En donde las materias primas utilizadas en la fabricación de cemento portland consisten principalmente de cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno rotatorio de producción, para

formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar. (5)

Tabla N°1. REQUISITOS QUIMICOS DEL CEMETO PORTLAND

	TIPOS				
	I	II	III	IV	V
Oxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) mínimo en porcentaje.	-	210	-	-	-
Oxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) máximo, en %	-	6.0	-	-	-
Oxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) máximo, en %.		6.0		6.5	
Oxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) máximo, en %.	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Anhídrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ )	x	x	x	x	x
Pérdida por calcinación, máximo, en %.	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Residuo insoluble máximo, en %.	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato tricalcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) máximo en %.	-	-	-	35	-
Silicato dicalcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) mínimo en%.	-	-	-	40	-
Aluminato tricalcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) máximo en %	-	8	15	7	5
Suma del Silicato tricalcico y Aluminato tricalcico, máximo en %.	-	58	-	-	-
Aluminoferritotetracalcico, mas dos veces el aluminato tricalcio( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )+2( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) máximo en %.	-	-	-	-	20.0

FUENTE: Manual de Concreto Parte 2

ELABORACION: Los autores

## 1.4.1.2 CLASIFICACION DE CEMENTO PORTLAND.

I.Común. Para uso general en construcciones de concreto cuando no se requiera las propiedades especiales de los tipos II, III, IV y V.

II.Modificado. Destinado a construcciones de concreto expuestas a una acción moderada de los sulfatos, o cuando se necesite calor de hidratación moderado.

III.De rápida resistencia alta. Para elaboración de concretos en los que se requiera alta resistencia a temprana edad.



IV. De bajo calor. Cuando se requiera un calor de hidratación reducido.

V. De alta resistencia a los sulfatos. Cuando se requiera una alta resistencia a la acción de los sulfatos.

El cemento Portland blanco se considera clasificado en el tipo I. Por su bajo o nulo contenido de óxido férrico, se caracteriza únicamente por ser de color blanco y no gris.

## 1.4.2 ARIDOS FINOS.

Podrá ser arena natural, triturada, o una combinación de ambas. Debe cumplir con los siguientes requisitos físicos:

### a) Granulometría

1. Análisis granulométrico. La granulometría del agregado fino, debe estar comprendida dentro de los límites de la Tabla N°2, según especificaciones en la Norma ASTM 33-90

Tabla N° 2 Requisitos de la granulometría de agregado para Hormigón. ASTM 33-90

MALLA	Agregado fino que pasa en porcentaje
9,51 mm (3/8 pulg)	100
4,76 mm (N. 4)	95 a 100
2,38 mm (N. 8)	80 a 100
1,19 mm (N. 16)	50 a 85
595 $\mu$ (N.30)	25 a 60
297 $\mu$ (N. 50)	10 a 30
149 $\mu$ (N. 100)	2 a 10

FUENTE: Manual de Concreto Parte 2

ELABORACION: Los autores



Con la determinación de este módulo, el agregado fino se clasifica de acuerdo a los siguientes límites expresados en la Tabla N°3:

Tabla N°3 Calificación de las arenas en función del módulo de finura

Arena gruesa	2,5 a 3,5
Arena fina	1,5 a 2,5
Arena my fina	0,5 a 1,5

2. Los porcentajes mínimos para el material que pasa las mallas N. 50 y N. 100 pueden reducirse a 5 y 0, respectivamente, si el agregado se va a usar en concreto con aire incluido que contenga más de 250 Kg de cemento por metro cúbico, o sin aire incluido con más de 310 Kg de cemento por metro cúbico, o bien si se utiliza un aditivo mineral que compense la deficiencia de porcentajes que pasan estas mallas.

El agregado fino no tendrá más del 45 por ciento retenido entre dos mallas consecutivas de las que se indican en el inciso a, y su módulo de finura no será menor de 2,3 ni mayor de 3,1. Si el módulo de finura varía en más de 0,20 del valor supuesto para el proporcionamiento del concreto, el agregado fino debe rechazarse, a menos que se lleven a cabo ajustes en la proporción de este para compensar la diferencia de granulometría.

- b) Sanidad. A excepción de lo que a continuación se indica, el agregado fino sujeto a cinco ciclos de ensaye de sanidad deberá mostrar una pérdida no mayor de 10 por ciento cuando se emplee sulfato de sodio o de 15 por ciento con sulfato de magnesio. La pérdida se calculará de acuerdo con la granulometría de una muestra que cumpla con las limitaciones enunciadas en el punto 1 de granulometría.
1. Puede aceptarse un agregado fino que no satisfaga los requerimientos indicados, siempre que otros concretos de propiedades comparables, fabricados con agregados similares procedentes de la misma fuente, hayan prestado servicio

satisfactorio al quedar expuestos a condiciones climatológicas semejantes a las que se espera encontrar. También puede aceptarse aquel que no cumpla con dichos requisitos y no tenga un registro de servicio comprobable, siempre que se resulten confiables al emplearse en concreto sujeto a pruebas de congelación y deshielo.

- c) Limitación de sustancias deletéreas. la cantidad en el agregado fino no deberá exceder de los límites enumerados en la Tabla N° 4.

Tabla N°4 Límites par sustancias deletéreas en agregado fino para Hormigón

MATERIAL	Max. En porcentaje del peso total de la muestra
Partículas desmenuzables	1
Material que pasa la malla N. 200 (74μ):	
Hormigón sujeto a abrasión	3,0 *
Cualquier otro hormigón	5,0 *
Cuando la apariencia de la superficie de hormigón sea importante	0,5
Cualquier otro hormigón	1

FUENTE: Manual de Concreto Parte II

ELABORACION: Los autores

- d) Impurezas orgánicas. El agregado fino no debe contener impurezas orgánicas en cantidades nocivas. El agregado fino que se utilice para fabricar hormigón que vaya a estar expuesto a humedad, sujeto a exposición prolongada bajo atmósfera húmeda, o en contacto con terreno húmedo, no debe contener materiales que produzcan reacciones nocivas con los álcalis del cemento en cantidad tal que causen expansión excesiva del hormigón o concreto. (4)



## 1.4.3 ARIDOS GRUESOS

La grava o agregado grueso es uno de los principales componentes del Hormigón, por este motivo su calidad es sumamente importante para garantizar buenos resultados.

El agregado grueso estará formado por roca o grava triturada obtenida de las fuentes previamente seleccionadas y analizadas en laboratorio, para certificar su calidad. El agregado grueso debe ser duro, resistente, limpio y sin recubrimiento de materiales extraños o de polvo, los cuales, en caso de presentarse, deberán ser eliminados mediante un procedimiento adecuado, como por ejemplo el lavado.

La forma de las partículas más pequeñas del agregado grueso de roca o grava triturada deberá ser generalmente cúbica y deberá estar razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas en todos los tamaños. (7)

## 1.4.4 AGUA

El papel del agua en la mezcla del Hormigón juega un rol importante, ya que su proporción va a determinar las propiedades tanto para la pasta de cemento fresco como para la del Hormigón, las cuales son extraordinarias para una sustancia de tan bajo peso molecular.

El agua que se emplee en la fabricación y curado del Hormigón debe ser limpia y estar libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materias orgánicas y demás sustancias que puedan ser nocivas. El agua potable generalmente puede aceptarse para la fabricación y curado de Hormigón. Se recomienda efectuar el análisis químico del agua disponible, para verificar que cumpla con los límites indicados en la Tabla N°5. (5)





Tabla N°5 Límites recomendables de impurezas en agua para concreto

Sulfatos (como $\text{SO}_4$ ), máx. en ppm	300
Cloruros (como Cl), máx. en ppm	300
Magnesio (como $\text{MgO}$ ), máx. ppm	150
Materia orgánica (Oxígeno consumido en medio ácido), máx. en ppm	10
Sólidos totales en solución, máx. en ppm	1 500
pH no menor de	7

FUENTE: Manual de Concreto Parte 2

ELABORACIÓN: Los autores

## 1.4.4.1 FUNCIONES DEL AGUA EN EL HORMIGÓN.

- **Reacción de hidratación.**

Participa en las reacciones de hidratación del cemento en una proporción 0,2 – 0,22 de peso del cemento.

- **Trabajabilidad y fluidez.**

Tiene la función de darle una trabajabilidad y una fluidez, necesaria para la puesta en obra. La cantidad de agua debe limitarse, ya que un exceso de agua produce una mayor porosidad en el hormigón.

- **Agente de curado.**

El agua actúa para reponer el agua perdida por las reacciones exotérmicas y para refrigerar la masa.



## 1.4.5 ADITIVOS

Los aditivos modifican las cualidades de los yesos aglomerantes principalmente retardando o acelerando el fraguado. Los aditivos se pueden clasificar en tres grupos que se muestran en la Tabla N°6

Tabla N° 6.- CLASIFICACION DE ADITIVOS

<b>GRUPO A</b>	Substancias que modifican la solubilidad de algunas fases que intervienen en la hidrólisis: el hemihidrato o el dihidrato. Como la rapidez del tiempo de fraguado en los yesos se justifica por la mayor solubilidad del hemihidrato con respecto a la del dihidratos, en consecuencia se obtendrá una acción retardante aplicando productos que consigan igualar estas solubilidades. Las sustancias con grupos carboxilos o complejos con iones $\text{Ca}^{++}$ reducen su concentración en la solución y desplazan el equilibrio de disolución aumentando la solubilidad del dihidrato ( $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y en consecuencia, retarda su precipitación.
<b>GRUPO B</b>	Substancia que forma grupos insolubles con el ion $\text{Ca}^{++}$ , con la consiguiente reducción de este en la solución. Además, la precipitación envuelve a los gérmenes cristalinos retrasando su engrosamiento y dificultando a su vez la disolución del propio dihidrato con el objeto de mantener la saturación. Pertenecen a este grupo los boratos, fosfatos, carbonatos, silicatos, etc.
<b>GRUPO C</b>	Los componentes orgánicos de elevado peso molecular y algunos coloides sobre los gérmenes de cristalización y sobre la velocidad de los cristales tanto por su precipitación sobre ellos como por el aumento de la viscosidad del medio, que frena las reacciones iónicas aun posibles por la difusión.

FUENTE: Manual de Concreto Parte 2

ELABORACION: Los autores



## 1.5 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA FÁBRICA HORMICRETO

La empresa Hormicreto se encarga de la fabricación de mezclas preparadas y premezcladas para hormigón y mortero.

Este Hormigón premezclado es llevado inmediatamente a obra para su construcción, y para su preparación se utilizan cinco materias primas principales que están indicadas en la siguiente tabla N°7.

Tabla N°7 Materias primas de la empresa Hormicreto

CÓDIGO	MATERIAL	NOMBRE
AG	AGREGADO GRUESO	RIPIO
AF	AGREGADO FINO	ARENA
CP	CEMENTO	CEMENTO PORTLAND TIPO I
AG	AGUA	AGUA
AD	ADITIVO	AD

De acuerdo con estudios previos, para el avance de la empresa, estas materias primas son mejoradas continuamente y sus propiedades físicas son determinadas para las modificaciones correspondientes del diseño de Hormigón. La empresa Hormicreto cuenta con un pre mezclador que mejora la calidad del Hormigón al ser una tecnología moderna que permite mejor homogenización de las proporciones de la materia prima antes de entrar al mixer que lo transporta y lo lleva a obra.

En el anexo N°1 se indica la hoja de control de calidad que debe contener el Cemento Portland tipo IP según las especificaciones de la NTE INEN 490 para cemento hidráulico compuesto.



## CAPITULO 2.

### METODOLOGÍAS PARA LA OBTENICIÓN DE HORMIGÓN SECO

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

Las diversas metodologías de obtención de hormigón se orientan al tipo de producto que se va a obtener. El hormigón que se busca será utilizado una vez que se adicione la cantidad de agua descrita en el empaque del productor y homogenizado manualmente en ese momento, convirtiéndose en una mezcla de Hormigón lista para ser puesta en obra, cuya característica principal sea la de una fácil aplicación por el usuario y que posea propiedades como: consistencia, trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

Teóricamente se conoce que en el Hormigón existen tres componentes principales en su dosificación, el más importante es el cemento, el cual contribuye con buena adherencia y cohesión. El segundo componente que los áridos, los cuales influyen directamente sobre la resistencia a la compresión a más de dar volumen. Finalmente el agua, elemento que produce la reacción de hidratación del cemento que influye directamente sobre la fluidez de la mezcla y la capacidad de dispersión de partículas.

Otros componentes no están obligatoriamente incluidos en la formulación de hormigones son los aditivos y el aire, que son modificadores de propiedades del Hormigón. Entonces, el diseño del este producto deberá considerar la deficiencia o exceso de uno o varios de los componentes ya que estos irán en contra de las prestaciones que debe cumplir el hormigón mencionados en las norma INEN 872.

Tanto la adecuación de la materia prima como la dosificación están orientadas a encontrar proporciones para mezclar los diferentes componentes del Hormigón Seco logrando una homogenización perfecta para que esta pueda ser empaquetada, sin perder sus propiedades físicas y químicas, en su uso posterior.



## 2.2 MÉTODOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN

Existen varios métodos de dosificación, todos ellos para su comprobación deben ser llevados a la práctica para ser corregidos, y adoptar una composición adecuada. Esto es debido a que se reducen las posibilidades de que un método de dosificación puede tener en cuenta a los factores que influyen en las propiedades del hormigón a conseguir, y en general estos se basan en tres tipos descritos a continuación.

- Dosificación del hormigón según mezcla de sus componentes en volumen, y en función de la riqueza de cemento que se necesite por m<sup>3</sup>.
- Dosificación por peso de sus componentes, partiendo de una cantidad fijada de cemento por m<sup>3</sup>.
- Dosificación en razón a las resistencias requeridas del hormigón a los 7, 14 ó 28 días (edad del hormigón).

## 2.2.1. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN SEGÚN MEZCLA DE SUS COMPONENTES EN VOLUMEN, Y EN FUNCIÓN DE LA RIQUEZA DE CEMENTO QUE SE NECESITE POR M<sup>3</sup>.

Este tipo de dosificación es el más antiguo, fácil y cómodo, en aquellas pequeñas obras donde la precariedad de medios precise su realización manual y a pie de obra. La tabla N°8 permite calcular de manera sencilla los materiales necesarios para la Producción de 1m<sup>3</sup> de este material, así como prever las materias precisas para el conjunto o volumen de hormigón que requiera la obra.

Tabla N°8 Cantidades para la obtención 1m<sup>3</sup> de Hormigón en Volumen

Dosificación o riqueza de cemento por metro cúbico de Hormigón (Kg/m <sup>3</sup> )	Proporciones			Litros			Material sólido para 1m <sup>3</sup> de hormigón: 1450l. Agua aproximada por m <sup>3</sup> , según cono:150-250l. Riqueza de cemento por m <sup>3</sup> , según calidad: 150-450Kg. Peso aproximado de 1m <sup>3</sup> de hormigón: 2200 - 2500Kg. Peso de 1 saco de cemento:50Kg. Volumen de 1 saco de cemento:33l. Peso de 1l de cemento en saco: 1,5Kg.
	Cemento	Arena	Grava	Cemento	Arena	Grava	Usos y empleos preferentes del Hormigón
100	1	6	12	75	450	900	Rellenos. Hormigón de limpieza o pobre.
150	1	4	8	110	440	880	Zanjas. Cimientos. Grandes espesores.
200	1	3	6	145	435	870	Muros de contención. Pozos de cimentación. Soleras
250	1	2,5	5	170	425	850	Pilares, soportes y prefabricados corrientes. Pavimentos
300	1	2	4	207	415	830	Hormigones armados. Zapatas. Muros especiales.
350	1	2	3	240	480	720	Hormigones para estructuras. Pilares. Vigas.
400	1	1,5	3	263	395	790	Forjados delgados. Piezas a fatiga. Viguetas.
450	1	1,5	2,5	290	435	725	Prefabricados especiales. Pretensados. Postensados.
500	1	1	2	360	360	730	Trabajos y obras muy especiales de gran control.

FUENTE: Manual de Concreto Parte 2

ELABORACIÓN: Los autores



## 2.2.2 DOSIFICACIÓN POR PESO DE SUS COMPONENTES, PARTIENDO DE UNA CANTIDAD FIJADA DE CEMENTO POR M<sup>3</sup>.

Para dosificar partiendo de una cantidad fijada de cemento por m<sup>3</sup> existen diferentes formas, siendo uno de ellos el Método Clásico, teniendo algunas técnicas, entre las más conocidas están El Sistema de Fuller basado en la parábola Gressenery la Fórmula de Bolomey quien perfecciona el método de Fuller.

### REQUISITOS PARA LA DOSIFICACIÓN:

#### Módulo de Finura.

El módulo de finura, es otra medida del grosor o tamaño, para agregado fino. Se define como un índice de su valor lubricante en la mezcla. Éste describe los tamaños de los agregados finos y juega 2 papeles en la misma:

- a) En primer lugar sirve de un relleno, que se acomoda dentro de los intersticios de los agregados gruesos.
- b) En segundo lugar sirve como lubricante para el agregado grueso, ya que le proporciona una serie de rodillos para mejorar la manejabilidad de la masa de Hormigón.

El módulo de finura sirve para poder determinar una granulometría óptima de debe tener el árido, ya que constituye el esqueleto en el Hormigón e influye directamente en sus propiedades, para el cálculo del módulo de finura (MF) primero se tiene que secar la arena con el fin de evitar que se agrupen sus granos por efecto de la humedad y queden retenidos por tamices de más abertura que los que corresponden al tamaño real de aquellos. El cálculo se lo realiza sumando los porcentajes retenidos acumulados por las mallas N° 4, 8, 16, 30, 50 y 100, y dividiendo esta suma entre 100.



## 2.2.2.1 DOSIFICACION DE UN HORMIGON POR EL SISTEMA DE FULLER

La dosificación por este sistema es para áridos redondeados, con un tamaño de 70mm y una riqueza mínima de cemento de 300 kilogramos por metro cubico de hormigón.

En base a dichas premisas, la dosificación de los áridos viene determinada por una curva de referencia (parábola de Gessner), la cual representa una granulometría continua, y su empleo favorece la total compenetración del conjunto de granos, lo que ayuda a una buena docilidad y densidad del conjunto (Figura N°2). Dicha curva patrón está representada por la siguiente ecuación:

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Ecuación N°1

Donde:

D= Luz de malla del tamiz que define el tamaño máximo del árido empleado en la mezcla.

d= Abertura de cada uno de los tamices empleados para determinar la granulometría del árido que se va a utilizar (siempre menor a D).

P= Representa el porcentaje de material en peso que pasa por cada uno de esos tamices (d).



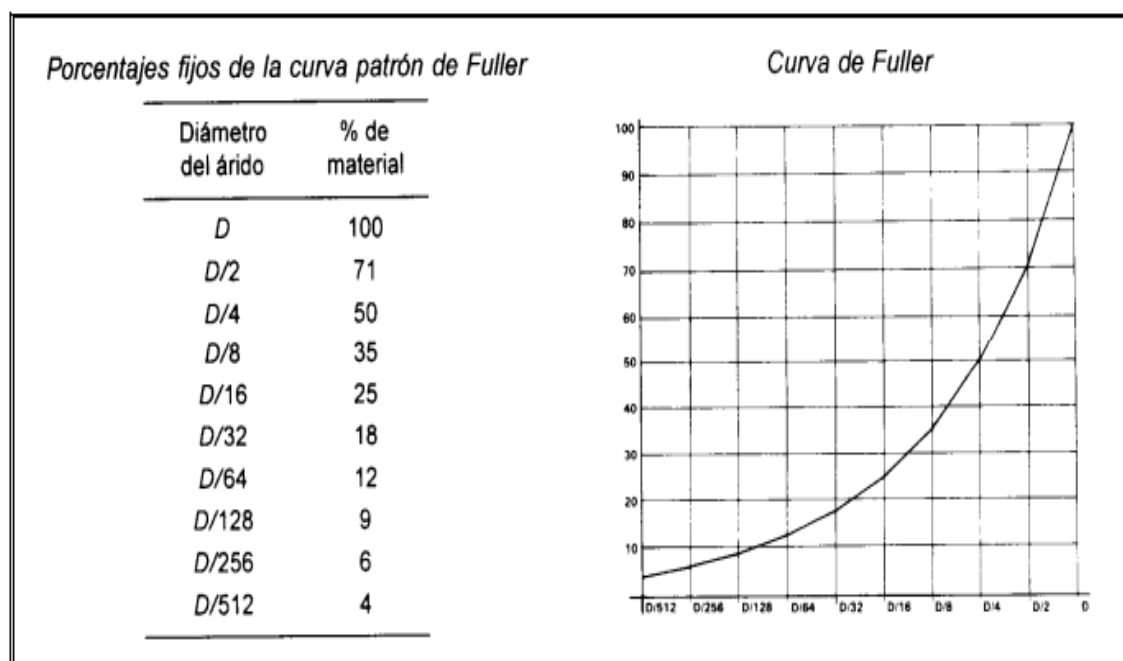


Figura N°2. Porcentajes y curva patrón según el método de Fuller.

FUENTE: Manual de Concreto Parte 2

ELABORACION: Los Autores

Posteriormente se calcula el módulo granulométrico o de finura (detallado en Requisitos de Método de Sistema Fuller) de cada fracción  $m_i$ , que es la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie utilizada, dividido entre cien, según indica la Ecuación N°2, esto se realiza para que la granulometría de la mezcla se ajuste a la curva de referencia.

$$m_i = \frac{\sum \% \text{ Retenidos Acumulados (Hasta Malla } 0,16\text{mm)}}{100} \quad \text{Ecuación N°2}$$

El paso a seguir, es realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los diferentes áridos a la curva de Füller, para ello puede emplearse un sistema de tanteos o uno basado en los módulos granulométricos. El sistema de tanteos consiste en un procedimiento gráfico con el propósito de conseguir que el árido resultante se adapte lo máximo posible a la curva teórica; así pues, deben realizarse tanteos hasta que las áreas por encima y por debajo de la curva de referencia queden compensadas. Con la práctica, suelen hacer falta pocos tanteos para lograr que la curva de composición se ciña lo mejor posible a la curva de referencia. (6)

Considerando que el árido está fraccionado en  $n$  tamaños, siendo  $m_1, m_2, \dots, m_n$  los módulos granulométricos de cada fracción y  $t_1, t_2, \dots, t_n$  los módulos granulométricos de las curvas de Fuller cuyos tamaños máximos coinciden con los de las fracciones  $1, 2, \dots, n$ ; siendo  $t_1, t_2, \dots, t_n$  los porcentajes que hay que tomar para que la granulometría de la mezcla se ajuste a la curva de referencia, se tendrá el siguiente sistema de  $n$  ecuaciones con  $n$  incógnitas:

$$t_1 + t_2 + \dots + t_n = 100 \quad \text{Ecuación N°3}$$

$$m_m = \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2 + t_3 m_3 + \dots + t_n m_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n} \quad \text{Ecuación N°4}$$

En el caso de emplear dos fracciones de árido para la resolución del sistema anterior, tenemos:

$$t_1 = 100 \frac{m_2 - m_{t2}}{m_2 - m_1} \quad \text{Ecuación N°5}$$

$$t_2 = 100 - t_1 \quad \text{Ecuación N° 6}$$

Una vez encontrada la proporción en la que hay que mezclar las distintas fracciones de los áridos, de  $1,025 \text{ m}^3$  se resta el volumen relativo del cemento más el del agua, necesarios para obtener la consistencia buscada, el volumen resultante se divide proporcionalmente entre los porcentajes obtenidos de la mezcla de los áridos.

La pasta hidratada ocupa un volumen menor que la suma de agua más cemento antes de hidratarse, debido a las pérdidas de agua del hormigón antes del fraguado, entre otras causas.(6)



## 2.2.2.2 DOSIFICACIÓN DE UN HORMIGÓN POR LA FÓRMULA DE BOLOMEY

Dosificar por Bolomey es un perfeccionamiento de la ley de Fuller, aunque los datos para operar sean los mismos, se trata de obtener en base a las resistencias un Hormigón económico en cemento, consistencia de la masa y forma de los áridos (redondeados o de machaqueo). El método está indicado para hormigones en masa, grandes macizos y presas. Debiéndose realizar un tanteo con mucho cuidado la curva granulométrica y los porcentajes de finos, pues aquí interviene, también, el cemento utilizado.

La fórmula propuesta por Bolomey es la siguiente:

$$P = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Ecuación N° 7

Donde:

P= Porcentaje de material (incluido el cemento) que pasará por el tamiz de valor d.

d= Abertura (mm) de cualquier tamiz utilizado para determinar la granulometría del árido.

D= Luz de malla del tamiz que define el tamaño máximo del árido empleado en la dosificación.

a= Coeficiente variable, según la consistencia del Hormigón y el tipo del árido empleado, de acuerdo a la Tabla N°9.

Tabla N° 9 Valores del coeficiente a de Bolomey

TIPO DE ÁRIDO	CONSISTENCIA	VALORES DE a
Rodado	Seco-plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Machaqueo	Seco-plástica	12
	Blanda	13
	Fluida	14

FUENTE: Fernández Canovas M.  
ELABORACIÓN: Los Autores

Para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los áridos a la curva tomada como referencia, tal como en el método de Fuller, se puede emplear un sistema de tanteos o bien uno teórico basado en los módulos granulométricos; siendo el segundo más exacto. En éste método se considera que el porcentaje de cemento que entra en la composición viene dado por la siguiente expresión:

$$t_0 = \frac{\frac{\text{PesoDelCementoPor.m}^3}{\text{Densidad RelativaDelCemento}} 100}{\text{Vol.TotalDeComponentesPor.m}^3 - \text{Vol.deAguaPor.m}^3} \quad \text{Ecuación N°8}$$

Se considera que el módulo granulométrico del cemento es nulo.

Si se supone que el árido está fraccionado en n+1 tamaños y se designan por m<sub>0</sub>, m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>,...m<sub>n</sub>, los módulos granulométricos de cada fracción y por mt<sub>1</sub>, mt<sub>2</sub>, mt<sub>3</sub>.....mt<sub>n</sub>, a los módulos granulométricos de las curvas de Bolomey cuyos tamaños máximos coinciden con las fracciones 1,2,3,...n, se tendrá el siguiente sistema de n+1 ecuaciones con n+1 incógnitas:

$$t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n = 100 \quad \text{Ecuación N°9}$$

$$m_m = \frac{t_0 m_0 + t_1 m_1 + t_2 m_2 + \dots + t_n m_n}{t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n} \quad \text{Ecuación N° 10}$$

Los módulos granulométricos m<sub>t1</sub>, m<sub>t2</sub>, m<sub>t3</sub> . no son los correspondientes a las curvas de Bolomey para cada tamaño máximo de la fracción de árido considerado, sino los modificados; de forma que si llamamos C<sub>n</sub> a la curva de Bolomey para el tamaño máximo del árido n, la curva C<sub>n-1</sub> para el árido de tamaño n-1 se deduce tomando los 100/m de las ordenadas sobre los mismos tamaños de la curva C<sub>n</sub>, siendo m la ordenada correspondiente al tamaño n-1, así sucesivamente se procederá para las ordenadas de las curvas C<sub>n-2</sub>, correspondientes al tamaño máximo del árido n-2.



Si el árido tiene dos fracciones, teniendo en cuenta que módulo granulométrico del cemento  $m_0 = 0$ , se deducen las ecuaciones:

$$t_1 = \frac{100(m_2 - m_{t2}) - t_0 m_2}{m_2 - m_1} \quad \text{Ecuación N° 11}$$

$$t_2 = 100 - (t_0 + t_1) \quad \text{Ecuación N° 12}$$

Si las fracciones son tres, se tiene:

$$t_0 + t_1 + t_2 = 100 \frac{m_3 - m_{t3}}{m_3 - m_{t2}} \quad \text{Ecuación N° 13}$$

La dosificación por metro cúbico del hormigón, al igual que en el método anterior, se determina sabiendo que los componentes de la pasta de hormigón deben sumar 1,025 m<sup>3</sup>.

## 2.2.3. MÉTODO BASADO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

### 2.2.3.1 MÉTODO SEGÚN DE LA PEÑA

Este método de dosificación por resistencias se aplica en hormigones estructurales de edificios, pavimentos, canales, depósitos de agua y puentes, partiendo de un contenido de 300 Kg/m<sup>3</sup> de cemento y cuando las condiciones de ejecución puedan estimarse como buenas.

Conociendo la resistencia media, bien directamente o a través de la característica que el Hormigón deba poseer, se determina la concentración o relación cemento/agua, en peso, por medio de:

$$Z = K \cdot f_{cm} + 0,5 \quad \text{Ecuación N°14}$$

Donde:

Z= Concentración o relación cemento/agua, en peso.

$f_{cm}$ = Resistencia media del Hormigón en  $N/mm^2$ , a 28 días, medida en probeta de  $15\phi \pm 3.0$

K= Es un parámetro que se define en la Tabla N°10, que depende del conglomerante y de los áridos utilizados.

Tabla N°10.-Valores del parámetro K

Conglomerante (clase)	Áridos rodados	Áridos machacados
22,5	0,072	0,045
32,5	0,054	0,035
42,5	0,045	0,03
52,5	0,038	0,026

FUENTE: Síntesis de la Tecnología de Concreto

ELABORACIÓN: Los autores

Este método considera como tamaño máximo del árido el de la abertura del tamiz más pequeño de la serie empleada que retenga menos del 25 por 100 de la fracción más gruesa del árido.

La consistencia del Hormigón a confeccionar depende de las características de los medios de puesta en obra. Generalmente, en estructuras vibradas se emplean las consistencias secas y plásticas, aunque si los hormigones se van a colocar en obra por bombeo, pueden emplearse las consistencias blandas. Estas permiten, colocar el hormigón mediante picado con barra, logrando un ahorro importante de energía, si bien estas consistencias no deben emplearse únicamente en casos extremos.

Tabla N°11 Determinación del agua de amasado

CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN	ÁRIDO DE CANTO RODADO			ÁRIDO DE MACHAQUEO		
	80mm	40mm	20mm	80mm	40mm	20mm
SECA	135	155	175	155	175	195
PLÁSTICA	150	170	190	170	190	210
BLANDA	165	185	205	185	205	225
FLUIDA	180	200	220	200	220	240
LÍQUIDA	195	215	235	215	235	255

FUENTE: Síntesis de Tecnología de Concreto

ELABORACIÓN: Los autores

La cantidad de agua por metro cúbico de hormigón necesaria para la confección del hormigón, en función del tipo y tamaño del árido a emplear, se obtiene de la Tabla N°11. El peso de cemento se determina una vez conocida la concentración, Z, y el volumen de agua por metro cúbico, Va, dado en la Tabla N°11 por medio de:

$$P_c = V_a \cdot Z$$

Ecuación N°15

Donde:

$P_c$  = Peso de cemento

$V_a$  = Volumen relativo del total de árido.

Z = Concentración o relación cemento/agua, en peso.

La proporción en que deben mezclarse los áridos se halla por medio del gráfico de la Figura N°3. Si se trata de una arena y un árido grueso, el porcentaje de arena, en volumen real, con referencia al volumen real de todo el árido, se determina en el gráfico entrando con el módulo granulométrico de la arena en ordenadas y viendo el punto en que la horizontal corta a la curva correspondiente al tamaño máximo del árido, en cuya vertical se tiene el porcentaje de arena en volumen, que restado a cien, da el porcentaje de árido grueso.

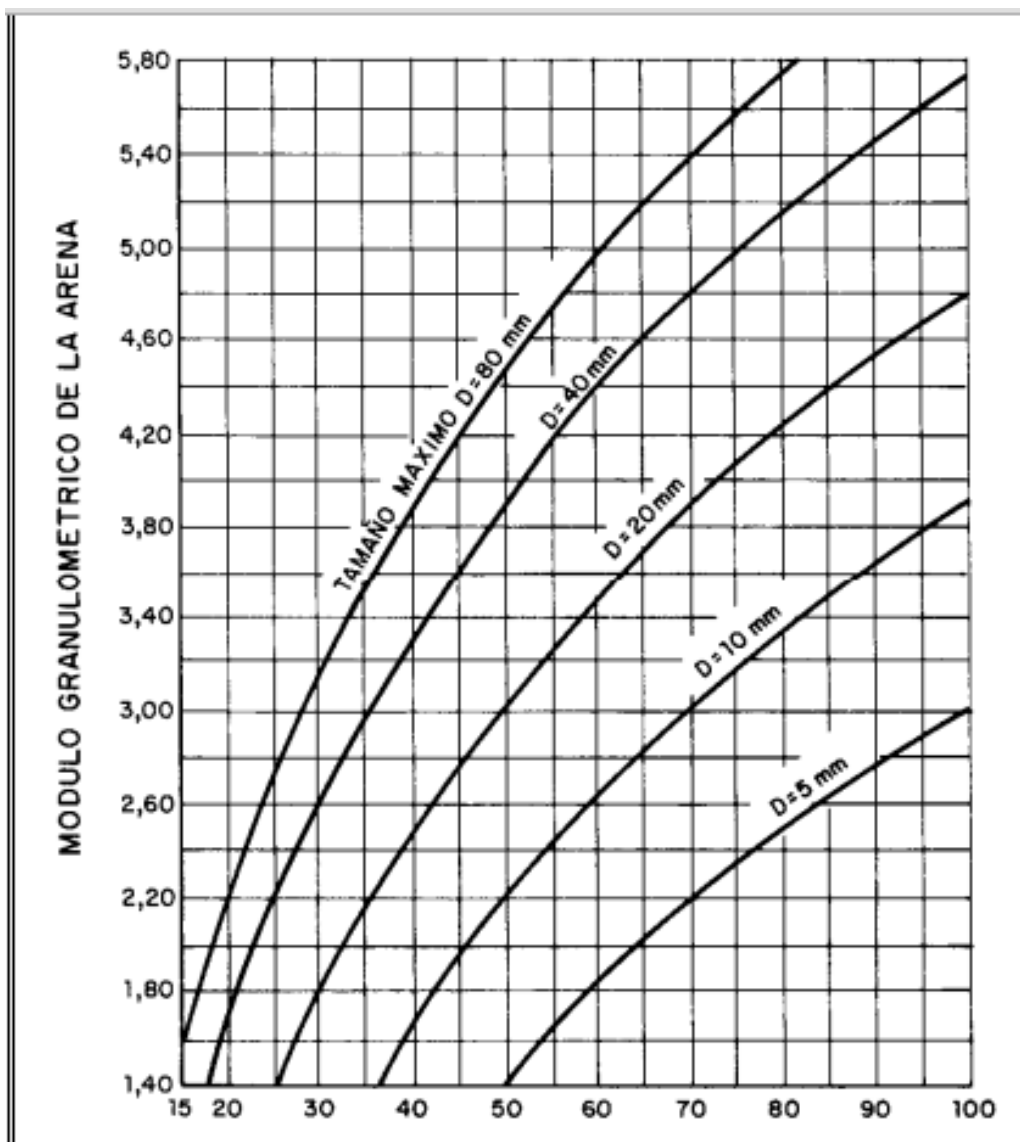


Figura N°3.-Porcentaje de arena referido a la suma de los volúmenes reales de los áridos que se van a mezclar.

FUENTE: Síntesis de Tecnología de Concreto

ELABORACIÓN: Los autores

Si en la composición del hormigón han de entrar más de dos áridos, se considera al de menor tamaño de ellos como "arena" y a los demás como "gravas". Se determina por medio del gráfico el porcentaje de "arena" con cada una de las "gravas" tomadas una a una.



Sean  $t_{a1}$ ,  $t_{a2}$ ,  $t_{a3}$ ..... $t_{ai}$ ..... $t_{an}$  los porcentajes de arena que resultan al considerar mezclas binarias con cada una de las fracciones de árido tomadas de menor a mayor tamaño.

El tanto por ciento de arena en volumen absoluto, con respecto a la suma del volumen absoluto de todos los áridos que entran en el hormigón, es:

$$t_0 = t_{an} \quad \text{Ecuación N°16}$$

El tanto por ciento de la mezcla total correspondiente a la fracción de menor tamaño, es:

$$t_1 = t_{an} \frac{100 - t_{a1}}{t_{a1}} \quad \text{Ecuación N°17}$$

El porcentaje que corresponde a la fracción situada en segundo lugar por su tamaño, es:

$$t_2 = t_{an} \frac{100 - t_{a2}}{t_{a2}} - t_1 \quad \text{Ecuación N°18}$$

El porcentaje de una fracción que ocupe el lugar  $i$ , por su tamaño máximo, contado de menor a mayor, es:

$$t_i = t_{an} \frac{100 - t_{ai}}{t_{ai}} - (t_1 + t_2 + \dots + t_{i-1}) \quad \text{Ecuación N°19}$$

La suma de todos los porcentajes de áridos debe cumplir:

$$t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n = 100 \quad \text{Ecuación N°20}$$



Los valores hallados en el gráfico corresponden a un hormigón armado de consistencia adecuada para consolidar por picado con barra y en el que se han empleado áridos naturales de forma redondeada. La dosificación del hormigón de acuerdo a la Ecuación N°16.

## 2.2.3.2 MÉTODO A.C.I. (AMERICAN CONCRET INSTITUTE) PARA HORMIGON CONVENCIONAL

ACI es una sociedad técnica sin fines de lucro y organización en desarrollo estándar (SDO). ACI fue fundada en 1904 y su sede se encuentra actualmente en Farmington Hills, Michigan, EE.UU. La misión de ACI es "ACI desarrolla y difunde el conocimiento basado en el consenso sobre el hormigón y sus usos."

El objetivo planteado es obtener un Hormigón con una resistencia a los 28 días de  $250 \text{ N/mm}^2$  que pueda ser comercializado en seco, es decir sin la incorporación del agua de mezclado, por tal motivo se ha tomado en cuenta aquel que está directamente relacionado con Resistencia a Compresión, el mismo que se detalla a continuación.

La dosificación de hormigón conocida también como "diseño de un hormigón" parte de características que debe cumplir un hormigón endurecido, y de las propiedades que deben cumplir la materia prima para que pueda ser empleada en la conformación de este producto.

Es importante tener presente que no es posible diseñar un hormigón cuyo uso se adapte a todo tipo de trabajo y exposición de ahí que se puede de manera sistemática seguir el siguiente procedimiento:

### **a) DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO Y SELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA Y CEMENTO SEGÚN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS.**

Para determinar estos parámetros se debe encontrar la relación agua/cemento en función a la resistencia a compresión a la que se desee llegar a los 28 días. Con esta relación y con el máximo y mínimo de agua se puede calcular matemáticamente la cantidad de cemento respectiva a cada relación agua/cemento. Por tanto, se ha tomado en cuenta los valores que se

presentan en la Tabla N°12 donde se recogen las relaciones agua/cemento que deben emplearse para conseguir las diferentes resistencias que normalmente se cuantifican a los 28 días, medidas en probetas cilíndricas de 15Φ x 30 cm, que se indican en la Norma vigente para Hormigones.

Tabla N° 12. Relación Agua/Cemento según Resistencia a compresión a 28 días.

Resistencia compresión a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	Relación agua/cemento, en peso
	Hormigón sin aire incorporado
45	0,38
40	0,43
30	0,48
35	0,55
25	0,62
20	0,7
15	0,8

FUENTE: Hormigón Manuel Fernández Canovas  
ELABORACION: Los Autores

La cantidad de agua a utilizar en el hormigón será una función de la consistencia que deba tener el mismo, (esta consistencia o trabajabilidad se explica al final de este método) del tamaño máximo de árido elegido, de su forma y de su granulometría, y estando relacionada directamente con la relación agua/cemento especificada en la Tabla N°12

En la Tabla N°13 se indican las cantidades máximas de agua a emplear para áridos machacados o agregados gruesos y con una granulometría determinada, si la cantidad de agua no es la indicada sería señal de que la forma o la granulometría de los áridos no son las adecuadas, en cuyo caso el aumento de agua debe ir acompañado de un aumento en la dosificación de cemento a fin que la relación agua/cemento permanezca constante. (2)

Tabla N°13.

Asiento en el cono de Abrams (cm)	Agua, en l/cm <sup>3</sup> , para los tamaños máximos, en mm.							
	10	12,5	20	25	40	50	70	150
Hormigón sin aire incorporado								
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-

FUENTE: Hormigón. Manuel Fernández Canovas

ELABORACION: Los Autores

## b) DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ÁRIDO GRUESO.

De acuerdo a la teoría del método ACI los áridos gruesos de mayor tamaño deben emplearse en la mayor cantidad posible compatible con la docilidad del hormigón a fin de conseguir la máxima resistencia, la mínima cantidad de agua de amasado y la menor retracción.

La cantidad de árido grueso se determina mediante la Tabla N°14, cuyo tamaño se ve sujeto a modificaciones de acuerdo a la disponibilidad de materia prima en la empresa Hormicroto, estos datos se han determinado para producir hormigones armados de buena docilidad. Los valores indicados pueden incrementarse en un 10 por 100 en el caso de hormigones para pavimentos.

Tabla N° 14. Volumen de Agregado Grueso con relación a su tamaño.

Tamaño máximo (mm)	Volumen de conjunto del árido grueso, en $10^{-3} \text{ l/m}^3$ de volumen de Hormigón, para diferentes módulos de finura de la arena			
	2,4	2,6	2,8	3
10	0,5	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,6
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,76	0,74	0,72	0,7
50	0,78	0,76	0,74	0,72
70	0,81	0,79	0,77	0,75
150	0,87	0,85	0,83	0,81

FUENTE: Manuel Fernández Canovas

ELABORACION: Los Autores

## c) DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ÁRIDO FINO

Esta determinación del contenido de árido fino, es la misma descrita en los métodos anteriores de dosificación, se determina mediante el sistema de los volúmenes absolutos. En este sistema, el volumen de arena fina se halla con la ecuación N°20

$$1025 = A + V_c + V_a \quad \text{Ecuación N°20}$$

Donde:

$A$  = Volumen de agua extraído de la tabla N° ( $\text{l/m}^3$ )

$V_c = C/\rho_c$  = Volumen relativo de cemento.

$C$  = Dosificación de cemento ( $\text{Kg/m}^3$ )

$\rho_c$  = Densidad del cemento

$V_a$  = Volumen relativo del total de árido.

## d) ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO MÍNIMO DE AIRE INCLUIDO.

El contenido de aire en una mezcla de Hormigón premezclada, se considera que es un 10% del Volumen total, este es el aire atrapado naturalmente cuando se realiza la homogenización de las materias primas. (2)

### 2.2.3.2.1 TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO

La trabajabilidad del Hormigón es la facilidad que este presenta para ser colocado y vibrado en cualquier molde, a esta se le conoce también como asentamiento. Los hormigones con bajo asentamiento presentan problemas de mezclado y problemas de compactación dentro del elemento a ser fundido lo que puede redundar en una disminución de la resistencia.

Esta facilidad del hormigón se puede categorizar en función del asentamiento del Cono de Abrams y está relacionada con la cantidad de agua empleada y por ende de la relación agua/cemento empleada en el diseño de la mezcla. En la Tabla N° 15 se presentan el asentamiento adecuado para un determinado tipo de construcción. (2)

Tabla N° 15.- Valores de Asentamiento según el Tipo de Construcción

TIPO DE CONSTRUCCION	ASIENTO (cm)	
	Máximo (*)	Mínimo
Muros armados en fundación y cimientos	8	2
Fundaciones, cajones y muros de hormigón en masa	8	2
Vigas y muros armados.	10	2
Soportes de edificio.	10	2
Pavimentos y losas.	8	2
(*) Los máximos anteriores pueden aumentarse en 2cm cuando no se emplee vibración.		

FUENTE: Hormigón. Manuel Fernández Canovas  
ELABORACION: Los Autores

## 2.2.3.2.2 MÉTODO DE CONO DE ABRAMS

El asentamiento se determina mediante el método del cono de Abrams y nos permite cuantificar la medida de la docilidad o consistencia de un hormigón en estado fresco.

Este método necesita del equipamiento necesario como lo son el cono truncado de un material no absorbente preferiblemente metálico, una base de un materia similar que permita que sobre él se apoye fuertemente al cono mientras dure el ensayo.

Primero es preciso humedecer el molde interiormente para evitar el rozamiento del hormigón con la superficie del mismo. Durante la operación de llenado y picado con la barra, el molde debe mantenerse fuertemente apoyado contra una base plana lográndose esto por medio de unos soportes adosados al molde y sobre los que se apoyan las puntas de los pies del operario. El hormigón fresco se ha de colocar en tres capas de igual altura dentro del cono y en cada capa se debe compactar con movimientos verticales distribuidos en forma circular desde afuera hacia adentro con una varilla para lograr que la masa de hormigón se distribuya uniformemente en este volumen.

Tanto las dimensiones de los instrumentos como la forma en la que se deben realizar este ensayo siguen una metodología normada, estos datos los podemos conocer en la Figura N°4.

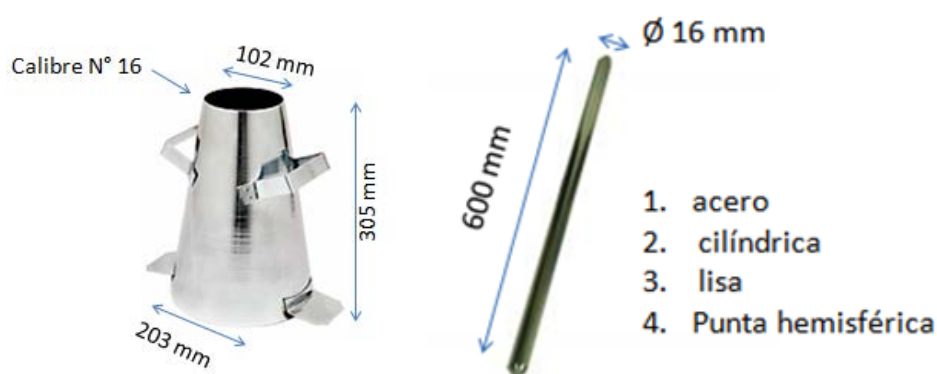


Figura N°4.

FUENTE: Laboratorio de Hormicrete Cía. Ltda.

ELABORACION: Los Autores

Los pasos a seguir para una toma correcta de asentamiento con el cono de Abrams se la podría enumerar en 8 sencillos pasos que se muestran en la Figura N°5 mostrada a continuación:

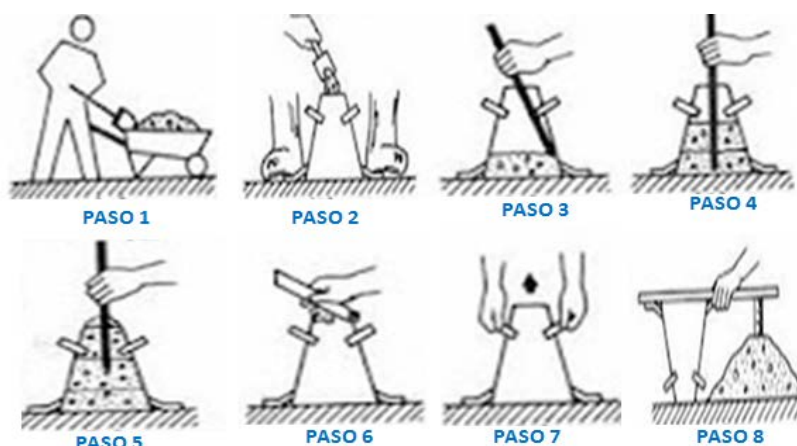


Figura N°5.

FUENTE: Laboratorio de Hormigreto Cía. Ltda.

ELABORACION: Los Autores

En la Figura N°5 podemos observar que el Hormigón se compacta en tres capas, aproximadamente la tercera parte del volumen del molde, que se compactan mediante 25 golpes efectuados con una barra de acero, cuyas medidas se encuentran detallaron en Figura N°4.

Una vez lleno y enrasada la cara superior del hormigón se eleva el molde verticalmente y con precaución, midiéndose el asentamiento experimentado por la cara superior del mismo. (2)

Al momento de medir el asentamiento se debe observar si la superficie superior no ha sufrido un corte en parte de su superficie provocando un deslizamiento en parte de la masa de hormigón ya que en este caso se debe repetir el ensayo y si este fenómeno se repite es síntoma de una falta de cohesión y se procede a revisar el diseño de hormigón.





La lectura del asentamiento se realiza con un flexómetro y para un hormigón seco debe estar dentro del rango de 6 a 10 centímetros, teniendo en cuenta que mientras mayor es la lectura mayor será la docilidad de la mezcla.

## CAPITULO 3.

### TEORIA DE DISEÑO EXPERIMENTAL

El término “experimento factorial” o “arreglo factorial” se refiere a la constitución de los tratamientos que se quieren comparar, por medio de diseños de Hormigones se busca seleccionar los factores a estudiar, sus niveles y la combinación de ellos.

El diseño de tratamientos es independiente para el diseño experimental que indica la manera en que los tratamientos se aleatorizan a las diferentes variables que intervienen en el Hormigón y las formas de controlar la variedad natural de las mismas.

Así el diseño experimental puede ser completamente al azar y para cada uno de estos diseños se puede tener un arreglo factorial de los tratamientos, estos se forman por la combinación de niveles de las variables que intervienen en la dosificación de un Hormigón, para de esta forma encontrar el punto óptimo en medio de un espacio tridimensional de combinaciones.

#### 3.1 DISEÑOS EXPERIMENTALES FACTORIALES

Todo fenómeno que podemos observar, y que presenta características susceptibles de ser medidas, exhibe un comportamiento variable. Sea este fenómeno un proceso llevado a cabo en un laboratorio de precisión, en que se puede tener un alto grado de control sobre los factores que causan variación, sea un proceso de fabricación con avanzada tecnología, o sea un fenómeno en que interviene en forma importante el ser humano, como los de tipo social, psicológico o económico. En el primer caso la variación es muy pequeña, casi imperceptible, pero aun así existe. En el caso de tipo humano las fuentes de



variación son numerosas, y es difícil distinguirlas debido a que la variación es muy grande.(6)

La variabilidad y la calidad son conceptos que se contraponen; puede definirse la calidad como la reducción de la variabilidad. Consecuentemente, el logro del mejoramiento de la calidad de lo que entrega un proceso, depende en gran medida del grado con que se pueden identificar y cuantificar las fuentes de variación de cada una de las etapas del proceso. Solo reduciendo la variabilidad y logrando diseñar procesos estables se puede mejorar la calidad de los productos y servicios.(6)

La estadística es la tecnología desarrollada específicamente para el estudio, análisis y comprensión de la variabilidad de los procesos. De ahí que prácticamente todos los métodos son útiles para el desarrollo de sistemas de mejoramiento de la calidad. (6)

## 3.2. DEFINICIONES.

**Experimento.** Un estudio en que el investigador tiene un alto grado de control sobre las fuentes de variación importantes, se denomina experimento. Si se tiene poco control sobre los factores, se habla de un estudio observacional.

**Factores.** Los fenómenos que potencialmente causan variación, y que son controlados por el experimentador, se denominan factores. También se denominan tratamientos.

**Niveles de un factor.** Son los valores que toma un factor. En general toman valores que se miden en escala categórica, aunque a veces suelen ser medidos en escalas numéricas.

**Combinación de Tratamientos.** Cada una de las combinaciones de niveles de todos los factores involucrados en el experimento.

**Corrida Experimental.** Cada una de las fases en que se lleva a cabo el experimento. Cada corrida experimental corresponde a una realización del experimento, bajo una determinada combinación de tratamientos, y produce una observación.

**Réplicas.** Todas las corridas experimentales que corresponden a una misma combinación de tratamientos. Son repeticiones del experimento, bajo idénticas condiciones de los factores. Tienen un doble objetivo: Lograr mayor precisión



en la estimación de los efectos de los factores y de sus interacciones, y estimas el error experimental.

**Experimento Balanceado.** Es un experimento en que todos los niveles que se les asignan, en la experimentación. El diseño es la parte que controla el experimentador.

**Respuesta.** La variable objetivo, que se pretende optimizar, y que depende potencialmente de los factores. La respuesta es lo que se mide como resultado de la experimentación, no es controlada por el experimentador. Es una variable medida en escala numérica.

**Efecto Principal.** Un efecto principal es la variación en la respuesta, atribuida al cambio en un factor determinado, a través de sus distintos niveles.

**Interacción.** El efecto producido por la acción de un factor, influido por la presencia de otro. Es un efecto combinado de dos o más factores. Si no existe un efecto e interacción, se dice que los efectos de los factores son aditivos.

**Error Experimental.** La parte de la variabilidad que no está explicada por los factores involucrados en el experimento.

### 3.3. DISEÑOS “UNO A LA VEZ”.

Consisten en mantener constante los valores de todos los factores que potencialmente inciden en el efecto que se quiere observar, menos uno de ellos, que es el que está siendo analizado. Esto se debe repetir para cada uno de los factores que se han identificado. Este es un tipo de experimentación bastante utilizado, pero con muchas limitaciones. Son adecuados cuando se presentan condiciones como las siguientes:

- 1) El resultado es una función compleja del factor, por lo que se deben emplear múltiples valores o niveles distintos del factor para determinar el comportamiento de la respuesta.
- 2) Los efectos resultantes no presentan interacciones. Esto significa que la forma del comportamiento de uno de ellos no es afectado por el nivel en que se encuentran los demás. En este caso se dice que los efectos son aditivos.



Estas situaciones se dan muy rara vez. Por lo general se presentan, en cambio, condiciones como las siguientes:

- 1) En la región experimental, es decir, el rango en que varían los valores de los factores, el efecto resultante presenta muy poca curvatura, y ésta no cambia de sentido, como sería, por ejemplo, el cambio de una región cóncava a una región convexa.
- 2) El nivel en que está un factor influye sobre la forma en que otro factor afecta la respuesta.

Bajo estas condiciones, el método de experimentación “uno a la vez” da resultados poco satisfactorios, muchas veces con conclusiones erróneas.

En general, es conveniente estudiar simultáneamente el efecto de dos o más factores, en un mismo experimento. Las ventajas de este procedimiento, sobre el hacer un experimento individual para cada factor, son, que se pueden estudiar las interacciones entre los factores, se ahorra tiempo y esfuerzo, y las conclusiones a que se lleguen tienen mayor aplicabilidad, debido a que cada factor se estudia bajo condiciones variables de los otros.

### 3.4. DISEÑO FACTORIAL $2^k$

Este diseño es importante, ya que permite mejorar un proceso por medio de la combinación y cambios en ellos a través de un experimento. Para ello se necesitan las herramientas estadísticas para poder experimentar y obtener resultados que signifiquen una mejora, una corrección o una estabilización en ese proceso o sistema.

En el diseño factorial  $2^k$ , se tienen  $k$  factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos como cualitativos. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  observaciones y se conoce como diseño general  $2^k$ .(1)

## 3.5. IMPORTANCIA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL:

La experimentación es importante porque permite obtener información de calidad, ya que juega un papel indispensable en los campos de investigación y el desarrollo es primordial. Dicha información es la que permite el desarrollo de nuevos productos y procesos, la mejora en cuanto a la comprensión de un sistema para así poder tomar las decisiones correctas acerca de cómo optimizarlo y mejorar su calidad comprobando hipótesis científicas. En la siguiente figura se esquematiza un sistema en donde ingresan variables que pueden y no ser controladas para llegar a obtener una respuesta de acuerdo a su interacción. (10)

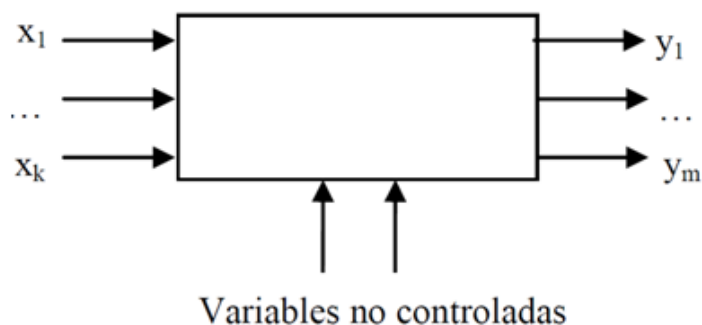


Figura # 6. Representación de un sistema en estudio en diseño estadístico de experimentos: factores (x), respuestas (y).

FUENTE: Probabilidad y Estadística

ELABORACIÓN: Los autores

## 3.6. CALIDAD DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

La Calidad del Diseño Experimental se caracteriza por el sometimiento a un método que garantiza la objetividad, la fiabilidad, la validez y la reproducción de los resultados. La Calidad Experimental es independiente del contenido de la investigación. Así, a continuación se muestran conceptos claves del tema que pueden guiar de mejor manera este concepto.



**Validez estadística:** Es aquella que indica si un estudio estadístico es capaz de arrojar conclusiones que estén de acuerdo con las leyes estadísticas y científicas. Esto significa que si una conclusión se extrae de un determinado conjunto de datos después de la experimentación se dice que es científicamente válida si la conclusión del experimento es científica y se basa en las leyes matemáticas y estadísticas.

Existen diferentes tipos de validez estadística que son relevantes para la investigación y la experimentación. Cada una es importante de acuerdo al caso que se esté tratando, para que el experimento brinde predicciones precisas y arroje conclusiones válidas. Entre ellas y la que más se ajusta a la optimización de Hormigón Seco es:

- **Validez interna:** Es el grado en que los cambios observados se pueden atribuir a la manipulación experimental. Estudia hasta que punto una causa puede ser atribuida a un efecto. Sin embargo, hay que resaltar que cuantas más variables entran en un diseño se va restando validez interna. De esta forma, se puede afirmar que para los casos analizados, el diseño factorial  $2^k$  fue utilizado apropiadamente ya que las variables que entraban en juego no eran muy numerosas y por el contrario, se trató mediante la aplicación del mismo minimizar dichas variables (2).

### 3.7. VENTAJAS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

- Elimina el efecto producto de las variables perturbadoras o extrañas, mediante el efecto de aleatorización.
- El control y manipulación de las variables predictorias clarifican la dirección y naturaleza de la causa.
- Flexibilidad, eficacia, simetría y manipulación estadística.

## 3.8. ETAPAS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL:

La metodología de la planificación experimental necesita de algunos pasos que finalizan en la solución del problema en estudio. Esta serie de pasos son necesarios pues de otra forma el problema podría no ser resuelto o bien definido, en otras palabras, este problema puede presentarse de tal forma que no sea factible una resolución científica eficiente. Los pasos fundamentales en los que se articula la metodología experimental para resolver un problema son:

1. Análisis del problema
2. Planificación de los experimentos.
3. Ejecución de los experimentos
4. Tratamiento estadístico de los datos y análisis de resultados
5. Responder las preguntas planteadas, sea directamente o utilizando un modelo matemático. Si es necesario, regresar a la etapa inicial.(3)

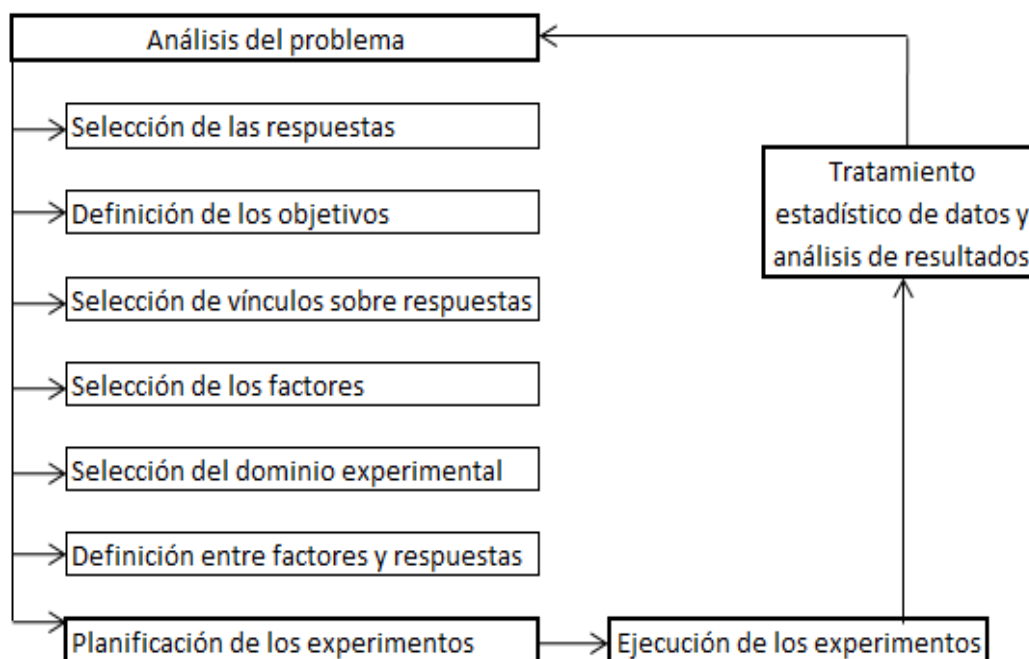


Figura # 7. Ciclo de resolución de un diseño experimental.

FUENTE: bibliográfica

ELABORACION: Los autores

## 3.8.1. ANALISIS DEL PROBLEMA

Como primer paso en el ciclo de resolución, este consiste en un análisis detallado del contexto conceptual y científico en el que se ubica la actividad a desarrollar. Esta fase se desarrolla antes de efectuar los experimentos tanto con contribución de expertos y no expertos, puesto que éstos últimos permitirán evidenciar aspectos que puedan estar en segundo plano. En esta etapa se desarrollan diversos pasos, que se muestran a continuación:

### 1. Definir de la función respuesta

De acuerdo a los resultados que se buscan en la tesis se inferirá en las variables que permitan dosificar apropiadamente un hormigón seco de tal forma que cumpla con las exigencias presentes en las normas descritas en la teoría.

### 2. Establecer los objetivos

El objetivo que se plantea es el de poder obtener una mezcla óptima de materias primas con el fin de que esta se pueda comercializar en seco, para ser utilizada una vez colocada la cantidad de agua necesaria para que esta mezcla se convierta en un Hormigón fresco y sea puesto en obra.

### 3. Definir los vínculos sobre la respuesta

De acuerdo con lo explicado en los métodos de dosificación los vínculos que influyen en la respuesta del producto a obtener, son las proporciones de cada una de las materias primas y su adecuado tratamiento. Cada uno de estos factores trabajan dentro de límites o niveles para establecer un óptimo en el espacio de acuerdo a las respuestas que se generen con las interacciones del diseño experimental.



## 4. Analizar el sistema estudiado

El sistema consta de un adecuado pre tratamiento de los factores que gobiernan el sistema, posterior a ello el diseño de Hormigón con todos los factores involucrados en el producto, el mismo que puede ser mejorado y optimizado por medio del diseño experimental.

## 5. Definir el dominio experimental

El dominio experimental está definido por los máximos y los mínimos de cada uno de los factores que intervienen en el proceso de obtención de Hormigón Seco, como se ha visto el tratamiento adecuado va a influir en los resultados del producto a obtener.

## 6. Establecer las hipótesis sobre las relaciones entre respuestas y factores.

Con base a las hipótesis planteadas entre los factores y respuestas se puede formular una definición clara del objetivo del trabajo, que en muchos casos es una función multirespuesta, en el sentido que el objetivo final consiste en alcanzar las mejores condiciones que satisfacen contemporáneamente todos los objetivos parciales definidos.

### 3.8.2. PLANIFICACION DE LOS EXPERIMENTOS

Es la fase en la cual se definen los experimentos que se tienen que realizar, se elabora una lista de los experimentos a desarrollar en el laboratorio, especificando el valor que cada factor es estudio debe tener en cada experimento, con la finalidad de medir una respuesta experimental en las condiciones establecidas de los factores, es decir en las condiciones experimentales establecidas.

#### **Simbolismo para las combinaciones de los factores:**

Existen algunas notaciones que se utilizan para los experimentos en el diseño  $2^k$ .

1. Notación "+,-", llamada geométrica.
2. Combinación con letras mayúsculas.



3. Utilización de dígitos 1 y 0 para denotar los niveles “alto” y “bajo” del factor respectivamente.

## Uso de letras mayúsculas.

Denotamos los niveles más altos de los factores A, B, C .....con las letras a, b, c, ..... Y los niveles más bajos de cada factor con la notación (1). En presencia de otras letras omitimos el símbolo (1).

## 3.8.3. EJECUCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

### 3.8.3.1. CONSTRUCCIÓN DE FRACCIONES 2K

## DISEÑO FACTORIAL COMPLETO

En la siguiente matriz se muestran todas las combinaciones de tratamientos con la simbología algebraica y la interacción sé que va a realizar con las variables de producción de Hormigón Seco.

MATRIZ			
	A	B	C
EXP.1	+	+	+
EXP.2	-	+	-
EXP.3	+	-	-
EXP.4	-	-	+
EXP.5	+	+	-
EXP.6	-	+	+
EXP.7	+	-	+
EXP.8	-	-	-

DONDE:

**A:** Contenido de Agua/Cemento

**B:** Aditivo



C: Arena

+: Nivel máximo de la variable

- : Nivel mínimo de la variable

## 3.8.4. TRATAMIENTO ESTADISTICO DE DATOS Y ANALISIS DE DATOS

### 3.8.4.1. PRUEBA ANOVA

La prueba ANOVA es una prueba paramétrica y como tal requiere una serie de supuestos para poder ser aplicada correctamente. Denominada ANOVA o análisis de la varianza, en realidad nos va a servir no solo para estudiar las dispersiones o varianzas de los grupos, sino para estudiar sus medias y la posibilidad de crear subconjuntos de grupos con medias iguales.

En el análisis de varianza ANOVA se requiere que cada uno de los grupos a comparar tenga distribuciones normales, o lo que es más exacto, que lo sean sus residuales. Los residuales son las diferencias entre cada valor y la media de su grupo. Se debe estudiar la dispersión o varianzas de los grupos, es decir estudiar su homogeneidad. Cuando mayor sean los tamaños de los grupos, menos importante es asegurar estos dos supuestos, ya que el ANOVA suele ser una técnica bastante “robusta” comportándose bien respecto a transgresiones de la normalidad. No obstante, si se tiene grupos de tamaño inferior a 30, es importante estudiar la normalidad de los residuos para ver la conveniencia o no de utilizar el análisis de la varianza. (12)

La variabilidad o varianza total se descompone en:

**-Varianza entre grupos.** Mide la variabilidad entre las medias de cada grupo respecto a la media total de todas las observaciones. Denominada también como variabilidad o varianza *inter-grupos*.



**-Varianza dentro de los grupos.** Mide la variabilidad de cada observación respecto a la media de su grupo. Se puede encontrar bajo el nombre de residual, error o varianza *intra-grupos*.

**Varianza Total = Varianza entre grupos + varianza dentro de los grupos**

Del mismo modo que se hace en la t de Student y con otras pruebas estadísticas, se divide un efecto observado respecto a un error aleatorio. A este cociente se le denomina F, o F de Fisher-Snedecor. Si sobrepasa cierto valor crítico, entonces se afirma que el efecto observado es demasiado grande para poder ser explicado por el azar (error aleatorio) y que por tanto no todos los grupos estudiados tienen la misma media.

### 3.9. PROCEDIMIENTO DE EXPERIMENTACION POR MEDIO DE UN DISEÑO FACTORIAL

El diseño factorial permite realizar experimentos que son importantes e indispensables dentro del campo de ingeniería, desarrollo de investigación. Para obtener la dosificación óptima del Hormigón se tiene que realizar una serie de experimentos y jugar con las cantidades de cada componente hasta encontrar una dosificación que cumpla con las propiedades propuestas en esta investigación, ya que para ello hemos optado por realizar el diseño experimental, ya que se tiene que llegar a la práctica para analizar el comportamiento de la materia prima de la empresa, con el fin de establecer un procedimiento adecuado para su posterior dosificación.

En este estudio se ha detallado las variables independientes establecidas, las cuales se van a analizar por medio de un diseño factorial fraccionario.



## 3.10. JUSTIFICACION DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES QUE GOBERNARÁN ESTE SISTEMA.

En el proceso de Dosificación de Hormigón intervienen de manera cuantitativa y cualitativa una serie de variables dentro del proceso de obtención, cada una de estas variables juegan un papel importante en el comportamiento posterior del Hormigón, estas variables que influyen directamente en el sistema son:

### 3.10.1 Relación Agua/Cemento

La Relación Agua/Cemento constituye un parámetro importante de la composición del hormigón, debido a que esta tiene influencia sobre la resistencia, la durabilidad y la retracción del hormigón. Por tal razón esta relación donde el agua y cemento se encuentran implícitos se ha tomado como una variable.

Los valores que se van a utilizar para esta relación de acuerdo con la fundamentación teórica (ver tabla N°12) tenemos:

Relación Agua/Cemento: 0,48 Valor mínimo

Relación Agua/Cemento: 0,55 Valor máximo

### 3.10.2 Determinación de la cantidad de Agua.

El agua de mezcla está relacionada directamente con la cantidad de cemento empleada y la trabajabilidad del Hormigón, jugando un papel importante en las propiedades físicas que este tendrá, su exceso o defecto provocan una falta de adherencia o de pérdida de resistencia, generando con ello una conclusión ya sea beneficiosa para mejorar el producto o perjudicial para descartar el nivel.



De acuerdo con la fundamentación teórica (ver tabla N°13) los límites de agua con la que se van a realizar la experimentación, están en función del tamaño máximo del árido grueso (12.5cm) y para una trabajabilidad de 8-10cm, los valores son:

Valor máximo de Agua: 220 cm<sup>3</sup>

Valor mínimo de Agua: 210 cm<sup>3</sup>

### 3.10.3 Determinación de la cantidad de Cemento

Este valor de Cemento se determina matemáticamente con el valor de la relación Agua/Cemento y teniendo ya las cantidades máximas y mínimas de agua, como se muestra a continuación:

Para la variable mínima de la relación agua/cemento de 0,48, las cantidades de agua y cemento con las que se van a trabajar en las interacciones del diseño experimental son las siguientes:

$$\frac{\text{agua}}{\text{cemento}} = 0,48 \quad \text{Ecuación N°21}$$

$$\begin{aligned} \text{agua} &= 210 \frac{l}{m^3} \\ \text{cemento} &= \frac{\text{agua}}{0,48} \\ \text{cemento} &= \frac{210}{0,48} = 437,5 \end{aligned}$$



Para la variable máxima de la relación agua/cemento de 0,55, las cantidades de agua y cemento con las que se van a trabajar en las interacciones del diseño experimental son:

$$\frac{\text{agua}}{\text{cemento}} = 0,55$$

$$\text{agua} = 220 \frac{l}{m^3}$$

$$\text{cemento} = \frac{\text{agua}}{0,55}$$

$$\text{cemento} = \frac{220}{0,55} = 400$$

### 3.10.4 Determinación del Agregado Fino (Arena)

El exceso o la carencia del agregado fino en el Hormigón es la clave para lograr una buena trabajabilidad. Para este cálculo recurrimos a la Ecuación N°20

Valor mínimo del Agregado Fino:

$$\text{VolumenÁridoFino} = 1025 - 210 - 144.4 - 10 - 288.9 = 371.711$$

Valor máximo del Agregado Fino:

$$\text{VolumenÁridoFino} = 1025 - 220 - 132,01 - 10 - 288.9 = 374,09$$

### 3.10.5 Determinación del Aditivo

El aditivo es considerado como una variable porque son modificadores y mejoradores de las mezclas de concreto. Son productos solubles en agua, que se adicionan en porcentajes no mayores al 1% de la masa de cemento, con el



propósito de producir una modificación en el comportamiento del concreto en estado fresco o en condiciones de trabajo. (12)

La importancia de los aditivos es que, entre otras acciones, permiten la producción de concretos con características diferentes a los tradicionales y han dado un creciente impulso a la construcción. Es por ello que se ha tomado en cuenta las características cualitativas que estos proporcionan a la mezcla de Hormigón, analizando por medio del diseño experimental cual es el aditivo que mejora de manera significativa las propiedades del producto a obtener.

En este diseño experimental se va a tomar como criterio del principio activo del aditivo que se va a utilizar, para analizar por medio de una serie de experimentos cual es que favorece con más beneficios para el Hormigón Seco.

El aditivo cuyo principio activo se basa en polimelaminas (A) es Superfluidificante y Fuerte Reductor de agua, que se lo utiliza en 1% en peso de cemento, dando como resultado:

- Resistencias muy elevadas
- Alto nivel de fluidez
- Mejor uniformidad de producto final
- Efecto dispersante

El efecto dispersante del aditivo A (base polimelaminas) se lo va a considerar como el valor máximo, siendo una característica que lo diferencia del aditivo B (base de policarboxilatos), esta propiedad de dispersión que le favorece al cemento produce una mejor hidratación y reparto del cemento cuando el Hormigón se encuentra en estado fresco, dando mejores resultados en la maduración del mismo. También aumenta la plasticidad y compactibilidad del Hormigón y el comportamiento del llenado se mejora.

El aditivo B es un plastificante, reductor de agua, que pertenece a la familia de los policarboxilatos que se utiliza en una dosis de 1% en peso de cemento, dando como resultado las siguientes características al Hormigón:



- Resistencias muy elevadas
- Fluidez
- Homogeneidad

Policarboxilatos: Químicamente se basan en copolímeros de ácido acrílico y ésteres de estos ácidos (comúnmente denominados policarboxilatos modificados) y, a diferencia de los plastificantes tradicionales, son macromoléculas que poseen cadenas laterales que les confieren "forma de peine". La síntesis específica de estas macromoléculas, especialmente de las cadenas laterales, es lo que los hace mucho más específicos, ya que dependiendo de la aplicación que se busque, son capaces de variar enormemente la trabajabilidad del hormigón, o bien pueden retrasar o acelerar de forma importante el fraguado, mejorar las resistencias iniciales y/o finales. Con este tipo de aditivos se pueden alcanzar reducciones de agua de hasta el 40%.

## CAPITULO 4.

### 4.1 EXPERIMENTACIÓN

Para la realización de la experimentación, primero se debe explicar la metodología de producción de Hormigón Seco, para lo cual se ha realizado un diagrama (DPO) que se muestra a continuación, en el cual se pueden identificar cada una de las etapas que se deben seguir para la producción. Teniendo en cuenta que el producto se lo vende empacado y en el mismo se especifica la cantidad de agua que se le tiene que adicionar para que este sea homogenizado por un tiempo determinado hasta obtener una pasta homogénea y así esta pueda ser llevada a construcción.

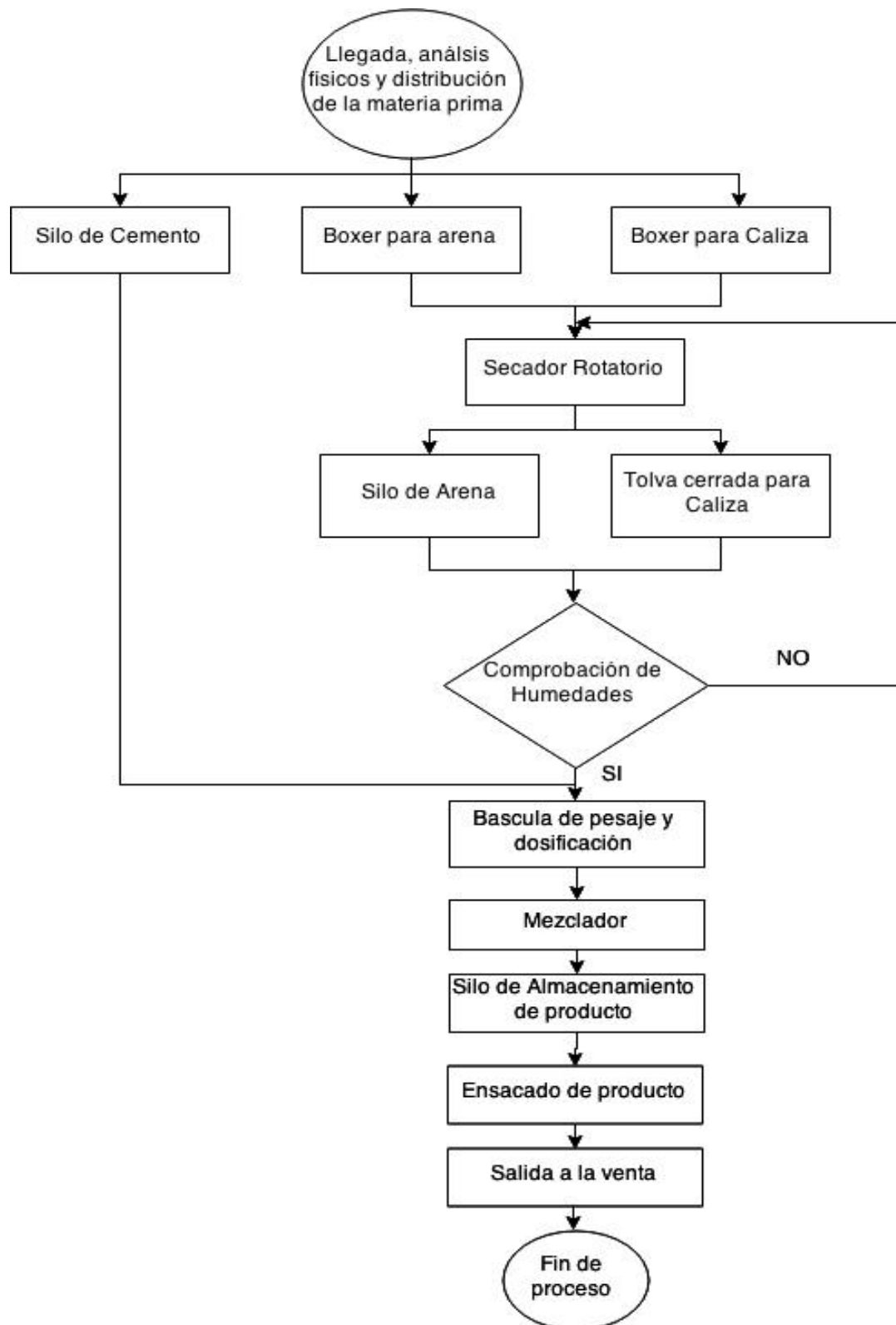


Figura N°8 PROCESO DE PRODUCCION DE HORMIGON SECO

FUENTE: Los autores

ELABORACIÓN: Los autores

## 4.2 TABLAS DE DATOS OBTENIDAS EN LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGON SECO $25N/mm^2$

Es importante mencionar que los factores a controlar fueron en función de la cantidad de agua, arena, y cemento y ya que al variar cualquiera de estas cantidades se pueden alterar algunas propiedades importantes en el Hormigón así como su trabajabilidad, la resistencia final entre las propiedades más importantes. Los valores de máximos y mínimos se encuentran indicados en la Tabla # 16.

Tabla # 16 Valores de Máximos y Mínimos de las variables que intervienen en la Dosificación de Hormigón Seco

VARIABLES (g)		
	MAXIMO	MINIMO
AGUA/CEMENTO	0,55	0,48
ADITIVO	A (polimelaminas)	B (policarboxilatos)
ARENA	987,584	981,311

A continuación en la Tabla N°17 se indica la dosificación obtenida para la producción de Hormigón Seco, con una relación agua/cemento de 0,55 y 0,48.

Tabla N°17 Datos de la dosificación de Hormigón Seco (en  $cm^3$  y g) para una relación Agua/Cemento 0,55 y 0,48

A/C	AGUA	CALIZA	AIRE	CEMENTO	ARENA	ADITIVO
0,48	210	288,902	10	144,389	371,709	A (polimelaminas)
	210	736,700	10	437,500	981,311	
0,55	220	288,902	10	132,013	374,085	B (policarboxilatos)
	220	736,700	10	400,000	987,584	

## 4.3. CUANTIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION.

Las propiedades físicas de la materia prima para la corrección de agua de mezclado tomadas en cuenta en la dosificación de Hormigón Seco se muestran a continuación en la Tabla #18. Estos valores fueron obtenidos en el Laboratorio de Hormicreto.

Tabla # 18. Propiedades físicas de las variables involucradas en Hormigón Seco

DATOS			
<b>Agregado grueso</b>	Humedad	0,30	%
	Absorción	2,10	%
	Densidad	2,55	g/cm3
	Peso Volumétrico	1,39	g/cm3
<b>ARENA</b>	Humedad	1	%
	Absorción	2,83	%
	Densidad	2,64	g/cm3
	Peso Volumetrico	1,61	g/cm3
<b>CEMENTO</b>	Densidad	3,03	g/cm3

La Tabla N°19 muestra los datos de la matriz con las correcciones de agua que se tienen que realizar para que la cantidades de agua determinada en el diseño no se vea afectada por las propiedades físicas de materia prima indicadas en la Tabla N°18.

Tabla N°19 Datos de la Dosificación de Hormigón Seco con la corrección de agua según propiedades físicas de las materias primas para los 8 experimentos

MATRIZ COMPLETA CON TODOS LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGON SECO (g)						
VARIABLES				CTE.	En función de agua/cemento	
	AGUA / CEMENTO	ADITIVO	ARENA	CALIZA	CEMENTO	AGUA
EXP.1	0,55	A	997,46	738,91	400	251,33
EXP.2	0,48	A	991,12	738,91	437,5	241,21
EXP.3	0,55	B	991,12	738,91	400	251,21
EXP.4	0,48	B	997,46	738,91	437,5	241,33
EXP.5	0,55	A	991,12	738,91	400	251,21
EXP.6	0,48	A	997,46	738,91	437,5	241,33
EXP.7	0,55	B	997,46	738,91	400	251,33
EXP.8	0,48	B	991,12	738,91	437,5	241,21

Aditivo A: Polimelaminas, Aditivo B: Policarboxilatos

Para el proceso de experimentación, se ha realizado un formato de hojas para llevar registrado sin ningún error todos los resultados de todos los experimentos que se realicen una vez ya establecidos los máximos y mínimos de cada una de las variables y componentes que intervienen en el proceso.

## FORMATO DE LAS HOJAS DE REGISTRO PARA LA EXPERIMENTACIÓN FACTORIAL

Con el fin de llevar un registro y evitar equivocaciones en los experimentos, se ha creado el siguiente formato para llevar de una manera más ordenada el desarrollo de la fase de experimentación y poder determinar cuantitativamente cual es el diseño que nos llevará a un óptimo.



PRUEBAS DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN SECO A PARTIR DE DISEÑO EXPERIMENTAL						
PRUEBA # 1	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:			1:	3 Días	
	Agregado fino			7		
	Agregado grueso					
	Agua			2:	7 Días	
	Cemento			5		
	Aditivo					
	Observaciones:			3:	28 Días	
				7		
PRUEBA # 2	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:			1:	3 Días	
	Agregado fino			4		
	Agregado grueso					
	Agua			2:	7 Días	
	Cemento			4		
	Aditivo					
	Observaciones:			3:	28 Días	
				6		
PRUEBA # 3	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:			1:	3 Días	
	Agregado fino			10,5		
	Agregado grueso					
	Agua			2:	7 Días	
	Cemento			9		
	Aditivo					
	Observaciones:			3:	28 Días	
				8		



## 4.4. CUANTIFICACION DE LOS RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION

A continuación se detalla la escala de calificación para determinar los resultados de cada experimento como de cada replica que se realice y para determinar la eficacia del uso del diseño experimental en la optimización de Hormigón Seco se ha establecido los siguientes parámetros para la calificación.

### 4.4.1. DETERMINACION DEL ASENTAMIENTO EN CADA DISEÑO

Esta calificación nos indicará si el Hormigón cumple con la trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuada a las condiciones de trabajo, es decir se verifica que dentro del proceso de puesta en obra este debe ser fácil de bombear, fácil de colocar y de acabar. Calificando en una escala del 1 al 4 tendremos:

1	Asentamiento 0-2 Mezcla muy seca
2	Asentamiento 3-5 Mezcla plástica
3	Asentamiento 6-8 Mezcla blanda
4	Asentamiento 9-10 Mezcla fluida

### 4.4.2. RESISTENCIA DE MADURACIÓN A LAS 28 DÍAS

Esta calificación indicará si el producto (Hormigón Seco) cumple con el objetivo planteado, adquirir una resistencia a compresión de  $25\text{N/mm}^2$  a los 28 días de maduración.

Una vez formados los cilindros, pasan por un proceso de curado y maduración, en donde a los 28 días determinan la resistencia a compresión, en



esta etapa se consigue o no llegar a la resistencia planteada, así como esta puede ser superada. Con lo expuesto en los objetivos, se va a calificar en los siguientes sentidos:

1	< 20 N/mm <sup>2</sup> El producto se encuentra lejos de cumplir con el objetivo planteado.
2	21-22 N/mm <sup>2</sup> El producto puede mejorarse
3	23-24 N/mm <sup>2</sup> El producto se encuentra cerca del objetivo planteado.
4	>25 N/mm <sup>2</sup> El producto cumple con el objetivo planteado

## 4.5. RESULTADOS DE CADA EXPERIMENTO DEL HORMIGÓN SECO

De acuerdo con el formato establecido, y con la realización del diseño experimental 2<sup>k</sup> en la fabricación y optimización de Hormigón Seco, se establecieron las condiciones de trabajo, así como se fijaron las variables que intervienen en el proceso y en el trayecto se anotaron las observaciones en el asentamiento de cada experimento y finalmente los resultados obtenidos.

Las calificaciones planteadas en esta investigación es de apreciación personal como investigadores del tema, se detallan en cada experimento los aspectos positivos y negativos tanto de la obtención como de la optimización, de esta manera los resultados del análisis realizado se considera como confiable.

Los detalles de la producción y experimentación de Hormigón Seco se presentan en el anexo 2 de imágenes de esta investigación.

### 4.5.1. REPRESENTACIÓN CUANTITATIVA DE LOS RESULTADOS

En la determinación de la trabajabilidad.

Experimentos	Asentamiento 1	Asentamiento 2	Asentamiento 3	Total
1	3	2	3	8
A	2	2	3	7
b	4	4	4	12





## UNIVERSIDAD DE CUENCA

c	2	1	2	5
ab	3	4	3	10
ac	1	1	2	4
bc	4	4	3	11
abc	2	2	3	7

En la resistencia a los 28 días.

Experimentos	Resistencia 1	Resistencia 2	Resistencia 3	Total
(1)	2	2	3	7
a	3	3	3	9
b	4	4	4	12
c	1	3	2	6
ab	3	3	2	8
ac	1	2	2	5
bc	4	3	4	11
abc	4	4	3	11

Resultados totales del proceso.

Experimentos	TOTAL ASENTAMIENTO	TOTAL RESISTENCIA	TOTAL
(1)	8	7	15
a	7	9	16
b	12	12	24
c	5	6	11
ab	10	8	18
ac	4	5	9
bc	11	11	22
abc	7	11	18

Con los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos del diseño factorial  $2^k$  se obtienen las variables que intervienen y afectan en este proceso, de esta manera se puede definir y se puede llegar a una optimización.

## 4.6. ANALISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)

Considere inicialmente un plan factorial  $2^2$  en el que hay  $n$  observaciones experimentales por combinación de tratamientos. Al extender la notación mencionada, tomamos ahora los símbolos (1), a, b y ab como los resultados totales para cada una de las cuatro combinaciones de tratamientos. La Tabla N°20 muestra dos direcciones de estos resultados totales y la Tabla N°21 muestra las combinaciones de tratamientos para este plan factorial. (13)

Tabla N°20 Experimento factorial  $2^2$

		B		MEDIA
A	-1	B		$\frac{b + (1)}{2n}$
	A	Ab		$\frac{ab + a}{2n}$
MEDIA		$\frac{a + (1)}{2n}$	$\frac{ab + b}{2n}$	

Tabla N°21. Combinación de tratamientos para Experimento factorial  $2^2$

Combinación de tratamientos	EFECTO FACTORIAL (simbólico)		
	A	B	AB
1	+	+	+
A	+	-	-



B	-	+	-
Ab	-	-	+

Se definen los siguientes contrastes entre los totales de los tratamientos:

Contraste A=  $-ab+a-b+(1)$

Contraste B=  $-ab-a+b+(1)$

Contraste AB=  $ab-a-b+(1)$

Es indiscutible que existirá un contraste de un solo grado de libertad para las medias de cada factor A y B el cual escribiremos como:

Cálculos de efectos

$$\omega_A = \frac{-ab + a - b + (1)}{2n} = \frac{\text{Contraste.A}}{2n} \quad \text{Ecuación N°22}$$

$$\omega_B = \frac{-ab + b - a + (1)}{2n} = \frac{\text{Contraste.B}}{2n} \quad \text{Ecuación N°23}$$

Podemos observar que la cantidad  $\omega_A$  es la diferencia entre la respuesta media en los niveles bajo y alto del factor A. de hecho, llamamos  $\omega_A$  el efecto principal de A. de igual manera,  $\omega_B$  es el efecto principal del factor B. se observa la interacción aparente en los datos al inspeccionar la diferencia entre  $ab - b$  y  $a - (1)$  o entre  $ab - a$  y  $b - (1)$  en la tabla (1). Si, por ejemplo: (13)

$$ab - a \approx b - (1) \text{ o } ab - a + (1) \approx 0, \quad \text{Ecuación N°24}$$

Una línea que conecta las respuestas para cada nivel el factor A en el nivel alto del factor B será aproximadamente paralela a una línea que conecta la respuesta para cada nivel del factor A en el nivel bajo del factor B. Las líneas no paralelas de la figura N°9:

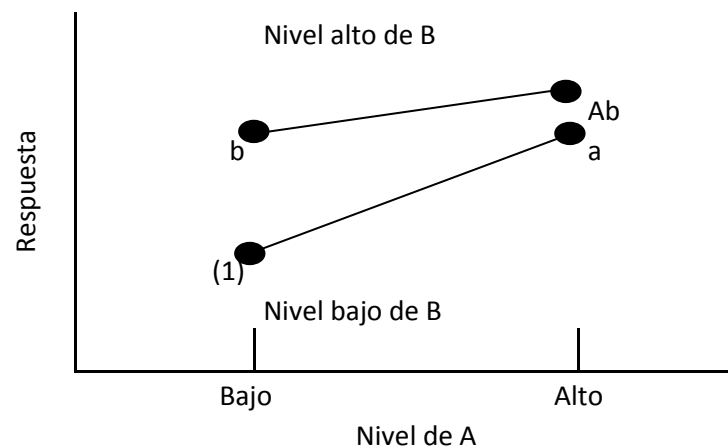


Fig. N°9 Respuesta que sugiere una interacción aparente  
FUENTE: Probabilidad y Estadística  
ELABORACIÓN: Los autores

sugieren la presencia de interacción. Para aprobar si esta interacción aparente es significativa se construye un tercer contraste en los totales de tratamiento ortogonales a los contrastes del efecto principal, que se llama **efecto de interacción**, mediante la evaluación de

$$\omega_{AB} = \frac{ab - a - b + (1)}{2n} = \frac{\text{Contraste}.AB}{2n}$$

Ecuación N°25

#### 4.6.1. CÁLCULO DE LA SUMA DE CUADRADOS

Es imperativo tomar ventaja del hecho que en el factorial  $2^k$  en este caso el experimento factorial  $2^k$  general, cada efecto principal y efecto de interacción tiene asociado un solo grado de libertad. Por tanto podemos escribir  $2^k - 1$  contrastes ortogonales de un solo grado de libertad en las combinaciones de tratamientos, donde cada uno representa la variación debida a algún efecto principal o de interacción. De esta manera, bajo las suposiciones acostumbradas de independencia y normalidad en el modelo experimental, podemos realizar pruebas para determinar si el contraste refleja la variación sistemática o sólo la variación casual o aleatoria. Las sumas de cuadrados para cada contraste se encuentran:(11)

Con un grado de libertad, de manera similar, podemos observar que:

$$SSB = SS\omega_B = \frac{[-ab + b + (1) - a]^2}{2^2 n} = \frac{(\text{Contraste.B})^2}{2^2 n}$$

Ecuación N°26

También:

$$SS(AB) = SS\omega_{AB} = \frac{[ab - b + (1) - a]^2}{2^2 n} = \frac{(\text{Contraste.AB})^2}{2^2 n}$$

Ecuación N°27

Con un grado de libertad, mientras que la suma de cuadrados de los errores, con  $2^2(n-1)$  grados de libertad, se obtiene por sustracción a partir de la fórmula.

$$SSE = SST - SSA - SSB - SS(AB)$$

Ecuación N°28

Al calcular las sumas de cuadrados para los efectos principales A y B y el efecto de interacción AB, es favorable presentar los resultados totales de las combinaciones de tratamientos junto con los signos algebraicos adecuados para cada contraste como en la siguiente tabla. Los efectos

principales se obtienen como cotejos simples entre los niveles máximo y mínimo. Por lo tanto, asignaremos un signo positivo a la combinación de tratamientos que está en el nivel máximo de un factor dado y un signo negativo a la combinación de tratamientos en el nivel mínimo. Los signos negativo y positivo para el efecto de interacción se obtienen al multiplicar los signos de los contrastes de los factores en interacción. (10)

Tabla N°22 Signos para los contrastes en el experimento factorial  $2^3$

Combinación de tratamientos	EFECTO FACTORIAL COMPLETO (simbólico)						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
(1)	-	-	-	+	+	+	-
a	+	-	-	-	-	+	+
b	-	+	-	-	+	-	+
c	-	-	+	+	-	-	+
ab	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	-	+	-	+	-	-
bc	-	+	+	-	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+

La suma de cuadrados para, la interacción ABC con 1 grado de libertad, está dada por

$$SS(ABC) = \frac{[abc + a + b + c - (1) - ab - ac - bc]^2}{2^3 n}$$

Ecuación N°29

y el efecto de interacción ABC está dado por

$$\omega(ABC) = \frac{[abc + a + b + c - (1) - ab - ac - bc]}{4 n}$$

Ecuación N°30



Para un experimento  $2^k$  factorial las sumas de cuadrados de un solo grado de libertad para los efectos principales y los efectos de interacción se obtienen al elevar al cuadrado los contrastes apropiados en los totales de los tratamientos y dividir entre  $2^k n$ , donde  $n$  es el número de réplicas de las combinaciones de tratamientos. (10)

Un efecto siempre se calcula al restar la respuesta promedio en el nivel “bajo” de la respuesta promedio en el nivel “alto”. El nivel alto y bajo para los efectos principales es bastante claro. El nivel alto y bajo simbólico para las interacciones es evidente a partir de información como la de la tabla del efecto factorial simbólico del diseño factorial  $2^3$ . (10)

Un experimento factorial permite investigar todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores o condiciones en cada prueba completa. El objetivo es investigar los resultados experimentales en casos donde interesa estudiar el efecto de diversas condiciones de experimentación y sus interacciones. En el Hormigón Seco se puede optimizar su diseño cuantitativamente y esta optimización se la va a realizar dentro el análisis estadístico. (10)

## 4.7. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS:



## 4.7.1. TABLA ANOVA EN EL ASENTAMIENTO:

Tabla N°31 Tabla ANOVA en el Asentamiento de la Producción de Hormigón Seco

FUENTE DE VARIACION	CONTRASTE	EFFECTOS	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CADRADO MEDIO	<i>f</i> CALCULADA
<b>EFFECTO PRINCIPAL</b>						
A	-8	-0,89	2,67	1	2,667	4,339
B	16	1,78	10,67	1	10,667	17,356
C	-10	-1,11	4,17	1	4,167	6,780
<b>INTERACCION DE DOS FACTORES</b>						
AB	-4	-0,44	0,67	1	0,667	1,085
AC	-2	-0,22	0,17	1	0,167	0,271
BC	2	0,22	0,17	1	0,167	0,271
<b>INTERACCION DE TRES FACTORES</b>						
ABC	-2	-0,22	0,17	1	0,167	0,271
<b>ERROR</b>			9,833333333	16	0,61458333	
<b>TOTAL</b>			<b>28,5</b>	<b>23</b>		
			<b>CV=</b>	3%		

## 4.7.2. TABLA ANOVA EN LA RESISTENCIA:





# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Tabla N°32 Tabla ANOVA de la Resistencia de la Producción de Hormigón Seco

FUENTE DE VARIACION	CONTRASTE	EFFECTOS	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CADRADO MEDIO	<i>f</i> CALCULADA
<b>EFFECTO PRINICIPAL</b>						
A	-3	-0,33	0,38	1	0,375	1,125
B	15	1,67	9,38	1	9,375	28,125
C	-3	-0,33	0,38	1	0,375	1,125
<b>INTERACCION DE DOS FACTORES</b>						
AB	-5	-0,56	1,04166667	1	1,042	3,125
AC	1	0,11	0,04	1	0,042	0,125
BC	7	0,78	2,04	1	2,042	6,125
<b>INTERACCION DE TRES FACTORES</b>						
ABC	7	0,78	2,04	1	2,042	6,125
<b>ERROR</b>			5,33	16	0,333	
<b>TOTAL</b>			<b>20,625</b>	<b>23</b>		
			<b>CV=</b>	2,51%		

## 4.7.3. TABLA ANOVA DE RESULTADOS TOTALES

AUTORES:  
JESSENIA JERVES  
FLAVIO MOROCHO



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Tabla N°33 Tabla ANOVA de los Totales de la Producción de Hormigón Seco

FUENTE DE VARIACION	CONTRASTE	EFFECTOS	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CADRADO MEDIO	<i>f</i> CALCULADA
<b>EFFECTO PRINCIPAL</b>						
A	-11	-1,22	5,04	1	5,042	0,928
B	31	3,44	40,04	1	40,042	7,368
C	-13	-1,44	7,04	1	7,042	1,296
<b>INTERACCION DE DOS FACTORES</b>						
AB	-9	-1,00	3,38	1	3,375	0,621
AC	-1	-0,11	0,04	1	0,042	0,008
BC	9	1,00	3,38	1	3,375	0,621
<b>INTERACCION DE TRES FACTORES</b>						
ABC	5	0,56	1,04	1	1,042	0,192
<b>ERROR</b>			43,48	8	5,435	
<b>TOTAL</b>			<b>103,4375</b>	<b>23</b>		
<b>CV=</b>				10%		

Con los análisis realizados en cada punto crítico de la formación de Hormigón Seco y el resultado total del proceso lo podremos resumir de la siguiente manera:



## CUADRO RESUMEN

Tabla N°34 Tabla Resumen del Estudio Estadístico en la Producción de Hormigón Seco

PROCESO	FUENTE DE VARIACION (RELEVANTE)	CALCULADA	VARIABLE
ASENTAMIENTO	B	17,35	Aditivo
RESISTENCIA	B	28,12	Aditivo
TOTALES	B	7,36	Aditivo

Cabe recalcar que cada uno de los análisis de varianza realizados se obtuvo un coeficiente de variación (CV) dentro de los límites adecuados para este tipo de experimentación. Esto nos dice que los resultados obtenidos son adecuados para realizar una optimización del producto.

## CAPITULO 5



## 5.1 OPTIMIZACIÓN DE HORMIGÓN SECO

Una vez culminado el análisis estadístico a través del diseño factorial  $2^K$ , con  $K=3$ , se va a realizar la optimización tomando en cuenta los resultados obtenidos y reduciendo una variable que más ha beneficiado en la respuesta.

Según la tabla N°34 Cuadro resumen del estudio estadístico de la producción de Hormigón Seco, la variable que mejor respuesta ha dado es el efecto principal B, saliendo a relucir en el estudio estadístico realizado para el asentamiento, resistencia y como también en los totales. Esta tabla brinda una guía clara para seleccionar los nuevos valores mínimos y máximos para los nuevas variables.

Cabe recalcar que al efecto principal B se lo analizó cualitativamente por los dos principios activos que presentaba, el aditivo A con base polimelaminas y el aditivo B con base de policarboxilatos, y de acuerdo la interacción de factores del diseño factorial  $2^K$  el aditivo que mejor efecto entregó a las pruebas de Hormigón fue el aditivo B con base policarboxilatos, por lo tanto en la optimización del producto este parámetro se convierte en constante, quedando un sistema con un diseño factorial  $2^K$ , con  $K=2$ . De la misma manera que se realizó para la obtención del producto, se van a seleccionar los nuevos valores para la optimización del Hormigón, siguiendo el mismo lineamiento y tomando en cuenta los resultados del análisis estadístico, tenemos que:

**A:** Relación Agua/Cemento

**B:** Agregado fino

Para la variable mínima de la relación agua/cemento de 0,53, las cantidades de agua y cemento con las que se van a trabajar en la optimización son las siguientes:



$$\frac{\text{agua}}{\text{cemento}} = 0,53$$

$$\text{agua} = 210 \frac{l}{m^3}$$

$$\text{cemento} = \frac{\text{agua}}{0,53}$$

$$\text{cemento} = \frac{210}{0,53} = 396,22$$

Para la variable máxima de la relación agua/cemento de 0,54, las cantidades de agua y cemento con las que se van a trabajar en las interacciones de optimización son:

$$\frac{\text{agua}}{\text{cemento}} = 0,54$$

$$\text{agua} = 215 \frac{l}{m^3}$$

$$\text{cemento} = \frac{\text{agua}}{0,54}$$

$$\text{cemento} = \frac{215}{0,54} = 398,14$$

Para determinar los valores de máximos y mínimos para el agregado fino recurrimos a la Ecuación N°16

Valor máximo del Agregado Fino:

$$\text{VolumenÁridoFino} = 1025 - 210 - 130,76 - 10 - 288,9 = 395,33$$

Valor mínimo del Agregado Fino:

$$\text{VolumenÁridoFino} = 1025 - 215 - 131,39 - 10 - 288,9 = 379,7$$

Una vez obtenidos los valores de máximos y mínimos de las dos variables tenemos la tabla N°35 y con ella la matriz de datos con los 4 experimentos:

Tabla N° 35 Valores de Máximos y Mínimos de las variables que intervienen en la Optimización de Hormigón Seco

VARIABLES (g)		
	MAXIMO	MINIMO
AGUA/CEMENTO	0,54	0,53
ARENA	1043,67	1002,4

Tabla N°36 Datos de la Optimización de Hormigón Seco con la corrección de agua.

MATRIZ COMPLETA CON LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA OPTIMIZACIÓN DE HORMIGON SECO (g) + EL AGUA DE ADICIÓN						
Exp.	VARIABLES		CONSTANTES		En función de agua/cemento	
	AGUA / CEMENTO	ARENA	ADITIVO	CALIZA	CEMENTO	AGUA
EXP.1	0,54	1054,11	B	738,91	398,15	247,3598
EXP.2	0,54	1012,42	B	738,91	398,15	246,6045
EXP.3	0,53	1054,11	B	738,91	396,23	242,3598
EXP.4	0,53	1012,70	B	738,91	396,23	241,6095

## 5.1.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CADA EXPERIMENTO

Siguiendo el formado establecido en la obtención de Hormigón Seco, y de acuerdo a la realización de la optimización, se han obtenido resultados deseados.



## REPRESENTACIÓN CUANTITATIVA DE LOS RESULTADOS

### EN EL ASENTAMIENTO

COMBINACIÓN DE FACTORES	Asentamiento 1	Asentamiento 2	Asentamiento 3	Total
(1)	3	3	2	8
A	4	4	3	11
B	3	2	2	7
Ab	3	3	2	8

### EN LA RESISTENCIA

COMBINACIÓN DE FACTORES	Resistencia 1	Resistencia 2	Resistencia 3	Total
(1)	2	3	2	7
A	4	4	4	12
B	2	3	3	8
Ab	3	4	3	10

## RESULTADOS TOTALES DE LA OPTIMIZACIÓN

Experimentos	ASENTAMIENTO	RESISTENCIA	Total
1	8	7	15
a	11	12	23
b	7	8	15
ab	8	10	18



Con el resultado total de cada uno de los experimentos realizados en el proceso de optimización del diseño factorial, se obtendrán los efectos mas relevantes que intervienen en este proceso, de esta manera nosotros podremos definir las proporciones óptimas del Hormigón Seco.

## 5.1.2 ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS:

### TABLA ANOVA EN EL ASENTAMIENTO:

Tabla N°37 Tabla ANOVA del Asentamiento en la Optimización de Hormigón Seco

FUENTE DE VARIACION	CONTRASTE	EFFECTOS	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CADRADO MEDIO	<i>f</i> CALCULADA
<b>EFFECTO PRINCIPAL</b>						
A	4	0,67	1,33	1	1,333	4,000
B	-4	-0,67	1,33	1	1,333	4,000
<b>INTERACCION DE DOS FACTORES</b>						
AB	-2	-0,33	0,33	1	0,333	1,000
<b>ERROR</b>			2,67	8	0,333	
<b>TOTAL</b>			5,667	11		
			CV=	5,25%		





## TABLA ANOVA EN LA RESISTENCIA:

Tabla N°38 Tabla ANOVA de la Resistencia en la Optimización de Hormigón Seco

	CONTRASTE	EFFECTOS	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CADRADO MEDIO	<i>f</i> CALCULADA
<b>EFFECTO PRINICIPAL</b>						
A	1	0,17	0,08	1	0,083	0,333
B	-7	-1,17	4,08	1	4,083	16,333
<b>INTERACCION DE DOS FACTORES</b>						
AB	-3	-0,50	0,75	1	0,750	3,000
<b>ERROR</b>			2,00	8	0,250	
<b>TOTAL</b>			<b>6,917</b>	<b>11</b>		
			<b>CV=</b>	4,55%		



## TABLA ANOVA RESULTADOS TOTALES:

Tabla N°39 Tabla ANOVA de los Resultados Totales en la Optimización de Hormigón Seco

FUENTE DE VARIACION	CONTRASTE	EFFECTOS	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CADRADO MEDIO	<i>f</i> CALCULADA
<b>EFFECTO PRINICIPAL</b>						
A	6	1,00	3,00	1	3,000	2,618
B	-10	-1,67	8,33	1	8,333	7,273
<b>INTERACCION DE DOS FACTORES</b>						
AB	-6	-1,00	3,00	1	3,000	2,618
<b>ERROR</b>			9,17	8	1,146	
<b>TOTAL</b>			<b>23,500</b>	<b>11</b>		
			<b>CV=</b>	9,73%		

De la misma manera que análisis estadístico de la producción de Hormigón Seco, se analiza específicamente en cada punto crítico de la optimización del producto y el resultado del proceso se puede resumir de la siguiente manera:



## CUADRO RESUMEN

Tabla N°40 Cuadro Resumen en la Optimización de Hormigón Seco

PROCESO	FUENTE DE VARIACION (RELEVANTE)	CALCULADA	VARIABLE
ASENTAMIENTO	A	4	Relación agua/cemento
	B	4	Agregado fino
RESISTENCIA	B	16,33	Agregado fino
TOTALES	B	7,27	Agregado fino

En los análisis de varianza se obtuvo un coeficiente de variación (CV) dentro de los límites adecuados con una precisión de buena, para este tipo de experimentación lo que indica que las combinaciones de tratamientos en la optimización de Hormigón Seco obtenidos se puede considerar como adecuados para los objetivos planteados en este estudio.



## CAPITULO 6

### 6.1. CONCLUSIONES DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN SECO

El diseño factorial  $2^k$  a permitido obtener un Hormigón que cumple el objetivo planteado en este estudio, con la interacción de 3 variables hemos concluido que:

- Con el diseño factorial  $2^k$  se demuestra que este es una herramienta de gran utilidad para la aplicación de un sin número de procesos industriales tal como es el caso, de la obtención de Hormigón Seco; producto que se obtuvo con un agregado grueso diferente al tradicional y que con la ausencia de agua pretende ser incorporado al mercado local y nacional por la empresa Hormicroto, y que por medio de un estudio estadístico proporciona resultados acerca de las interacciones que se dan entre las variables presentes en el sistema lo que permite resultados concretos y con precisión.
- El resultado obtenido del análisis realizado en esta investigación nos brindó información adecuada para establecer nuevos límites para realizar la optimización del producto sin ningún inconveniente para el cumplimiento del objetivo planteado en esta investigación.
- De acuerdo a las características que este producto debía poseer y con un estudio preliminar, pudimos establecer las variables que influyen en el sistema de producción de Hormigón Seco.
- Con el diseño factorial se observó que las interacciones son diferentes en cada experimento, analizando las variables que influyen dentro del sistema de manera colectiva, así tenemos:

Según el análisis de varianza (ANOVA) realizada en el **ASENTAMIENTO** resulta que:

La interacción B (aditivo) es la que resulta más relevante dentro de este estudio seguido de las interacciones de un factor C (Arena) y A (Relación agua/cemento) las mismas que proporcionan el mismo resultado dentro del sistema.



De igual importancia dentro del estudio estadístico presentan la interacción de dos factores BC (Aditivo, Arena). Esto da a relucir en la experimentación ya que el aditivo polimelaminas fue el que no dio los resultados deseados en el Hormigón, a más de que la trabajabilidad tampoco fue buena, con ello dieron malos resultados en la resistencia final del producto.

Todo el análisis realizado fue sirvió para establecer un procedimiento adecuado para la obtención de un Hormigón de determinadas características, las condiciones óptimas de trabajo establecidas se encuentran reflejadas en el cuadro resumen ubicado al final del análisis de la experimentación:

En el cual los parámetros resaltados en color presentan las condiciones optimas de trabajo.

De acuerdo al análisis de varianza (tabla ANOVA) hecha en la **RESISTENCIA** tenemos que:

De acuerdo a las consideraciones que tuvimos en la resistencia el efecto principal B correspondiente al aditivo policarboxilato y la interacción de tres factores BC representando aditivo y arena, conjuntamente presentando el mismo resultado con las interacciones ABC relación agua/cemento, aditivo y arena que son las más relevantes dentro del sistema.

Esto fué comprobado ya que la mayoría de cilindros elaborados a partir de polimelaminas no dieron los resultados esperados, tanto en el asentamiento como ahora en la resistencia.

De acuerdo al análisis de la varianza (tabla ANOVA RESULTADOS TOTALES) tenemos que:

La interacción del factor B (aditivo) es el más relevante dentro del sistema seguido del efecto principal C (Arena).

Se resalta nuevamente que el efecto principal B se vuelve a repetir, y este es evaluado cualitativamente, es decir evaluando el principio activo del aditivo, y nos podemos dar cuenta que en las pruebas realizadas con el principio activo de policarboxilatos nos dieron mejores resultados en



todos los sentidos, con esto podemos tomar una decisión en la optimización del producto, descartando el aditivo con base polimelaminas y tomando como constante al aditivo con base policarboxilatos, ya que este influye directamente con mejores resultados.

Con los resultados obtenidos en el análisis podemos establecer bajo qué condiciones se debe trabajar en la optimización de Hormigón Seco, estas son las siguientes:

Para lograr un trabajo más eficiente dentro del sistema de producción de Hormigón Seco proponemos que se trabaje con una relación agua/cemento de 0,55, valor que corresponde al máximo propuesto en la investigación, ya que con este se logra obtener los objetivos planteados y alrededor del mismo se puede optimizar.

En cuanto al aditivo utilizado se recomienda aquel contiene el principio activo de policarboxilatos, ya que este a dado los mejores resultados, logrando obtener mayores resistencias y una buena trabajabilidad.

Cuando nos referimos al parámetro agregado fino o arena se recomienda trabajar con el valor máximo referencial estudiado en este proyecto que es el indicado en la tabla N°41

## TABLA RESUMEN

Tabla N°41 Cuadro resumen del estudio estadístico de la producción de Hormigón Seco.

VARIABLES (g)		
PARÁMETROS	LÍMITES MAXIMOS	LÍMITES MINIMOS
AGUA/CEMENTO	0,55	0,48
ADITIVO	A (polimelaminas)	B (policarboxilatos)
ARENA	987,584	981,311

Por medio de estos análisis podemos realizar la optimización correctamente, ya que con la ayuda del estudio estadístico se llega a la conclusión convertir a la variable que mejores resultados nos dio (Aditivo con



base policarboxilatos) en constante, reduciendo el sistema de trabajo para encontrar un óptimo.

## 6.2. CONCLUSIONES DE LA OPTIMIZACIÓN DE HORMIGÓN SECO

Después de haber culminado el análisis estadístico de la optimización de Hormigón Seco a través del diseño factorial  $2^k$ , con  $k=2$ , hemos concluido que:

Mediante el estudio preliminar en cuanto a la producción de Hormigón Seco, obtuvimos información bastante apropiada que nos ayudó a definir matemáticamente las nuevas variables que influyen en el sistema.

Este análisis fue una guía para establecer las cantidades óptimas para el Hormigón Seco, y estas condiciones establecidas en la investigación se ven reflejadas en el cuadro resumen ubicado al final del análisis de la optimización.

Las interacciones son diferentes si se analiza de manera individual que de manera colectiva, de esta forma tendremos:

De acuerdo al análisis de la varianza (tabla ANOVA) hecha en el **ASENTAMIENTO** tenemos que:

De igual importancia dentro del estudio estadístico presenta el efecto principal A (Relación agua/cemento) con el efecto B (Arena), que resultan más relevantes dentro de este estudio. Esto lo comprobamos dentro de la experimentación ya que los cilindros presentaron mayores resistencias y una buena trabajabilidad.

De acuerdo al análisis de la varianza (tabla ANOVA) hecha en la **RESISTENCIA** tenemos que:

Dentro de este análisis observamos que la interacción más relevante la presenta el efecto principal B (Arena), seguido de la interacción de dos factores AB (Relación agua/cemento y Arena), esto puede ser debido a

la cantidad optima de arena ayuda a adquirir una buena resistencia, ya que su exceso o defecto puede intervenir de manera contraria en las propiedades del Hormigón.

De acuerdo al análisis de la varianza (tabla ANOVA resultados totales) tenemos que:

El efecto principal B (Arena) es el más relevante dentro del sistema, seguido conjuntamente de efecto A (Relación agua/cemento) y AB con igual importancia.

Consideramos de vital importancia para la producción de Hormigón Seco, el efecto principal B (Arena), que si bien se lo calcula por medio de una diferencia de volúmenes puede influir de manera importante en el sistema, y esto se vio dentro de la experimentación que la pequeña diferencia de este efecto da distintos resultados en los cilindros de Hormigón.

De acuerdo a los resultados obtenidos se recomienda trabajar con los valores presentados en la siguiente tabla:

Tabla N° 42 Tabla resumen de la optimización de Hormigón Seco

PARÁMETROS	MAXIMO	MINIMO
AGUA/CEMENTO	0,54	0,53
ARENA	1043,67	1002,4

Por medio de estos análisis podemos establecer que se realizó correctamente la optimización del sistema, como hemos visto en el anexo N°4 las resistencias aumentaron, y al mismo tiempo se disminuyó la cantidad de cemento, lo que significa a demás un ahorro a la empresa.




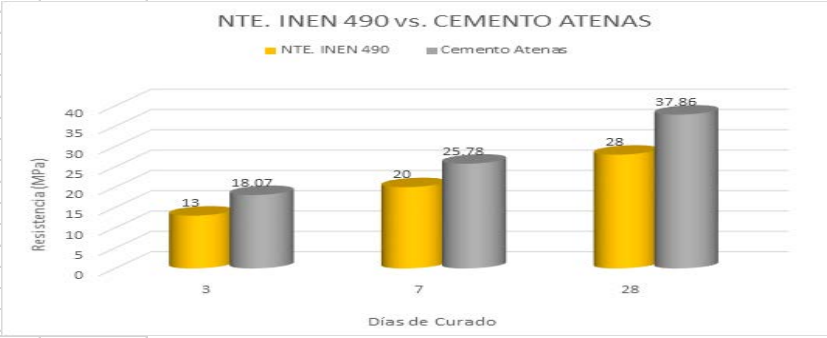


## 6.3. RECOMENDACIONES

Luego de haber establecido los parámetros óptimos para la producción de Hormigón Seco, podemos recomendar lo siguiente:

- Tomar en cuenta las propiedades físicas (absorción y humedad) de las materias primas con las que se esté trabajando ya que las mismas van a alterar de manera directa tanto la trabajabilidad y por ende la resistencia del Hormigón.
- Capacitar a los obreros para una correcta determinación de propiedades físicas de la materia prima, ya que con estos datos se realizan las correcciones del diseño del Hormigón, afectando directamente las propiedades del producto final en caso de que estas no sean las correctas.
- La optimización nunca termina, siempre se puede mejorar el proceso de acuerdo a lo establecido, según la materia prima con la que se trabaje, la procedencia de la misma y el grado de pureza de la misma pueden alterar la calidad del producto.
- Esta optimización está correcta para la materia prima con la que cuenta la empresa, en caso de que se cambié, los datos establecidos en esta investigación deben ser modificados y corregidos.
- Los diseños presentados en esta investigación deben ser llevados a la práctica para su corrección y optimización, los valores obtenidos en este estudio no son los mismos para materias primas diferentes y con diferentes propiedades físicas.
- El diseño experimental tiene gran importancia y validez siempre y cuando se seleccionen de manera correcta las variables que intervienen en el sistema, caso contrario perdería su eficacia.
- Luego de conocer la importancia de la aplicación de un diseño estadístico en la producción de Hormigón en los que interviene un Ingeniero Químico se recomienda, impartir en la cátedra de probabilidad y estadística el estudio de análisis de diseño de experimentos enfocado al estudio de DISEÑO FACTORIAL.

## ANEXO N°1


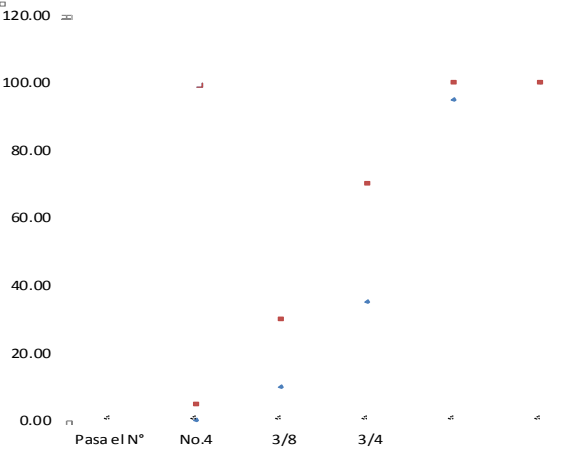
 <b>DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD</b> <b>REPORTE DE CALIDAD DE PRODUCTO</b>									
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>									
Proveedor: Industrias Químicas del Azuay					Cliente que solicita:				
Dirección: Panamericana Norte Km 4 1/2									
Teléfono: 07 2 80 80 09									
<b>PRODUCTO: CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO. TIPO IP</b>									
<b>Período de análisis: 01 al 31 de enero de 2015</b>									
<b>REQUISITOS OBLIGATORIOS SEGÚN NORMA NTE INEN 490:2010 - QUINTA REVISIÓN</b>									
<b>REQUISITOS QUÍMICOS</b>					<b>REQUISITOS FÍSICOS</b>				
PARÁMETRO	MÉTODO	UNIDAD	INEN 490	RESULTADO	PARÁMETRO	MÉTODO	UNIDAD	INEN 490	RESULTADO
SiO <sub>2</sub>	-	%	N/A	23.64	Finura (Blaine)	INEN 196	cm <sup>2</sup> /g	N/A	4091
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	%	N/A	4.45	Retenido en 45 µm (N° 325)	INEN 957	%	N/A	2.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	%	N/A	2.19	Expansión en autoclave	INEN 200	%	0.8 máx	N/D
CaO	-	%	N/A	54.79	Contracción en Autoclave	INEN 200	%	0.2 máx	N/D
MgO	INEN 160	%	6.0 máx	0.91	Fraguado inicial	INEN 158	min	45	162
SO <sub>3</sub>	INEN 160	%	4.0 máx	2.57	Fraguado final	INEN 195	min	420	226
Pérdida por	INEN 160	%	5.0 máx	5.5	Contenido de aire en mortero	INEN 196	%	13 máx	2.34
Densidad	INEN 156	g/cc	2.9 mín	2.92					
<b>REQUISITOS OPCIONALES</b>					<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN</b>				
PARÁMETRO	MÉTODO	UNIDAD	INEN 490	RESULTADO	PERIODO	MÉTODO	UNIDAD	INEN 490	RESULTADO
Expansión de barra de mortero (14 días)	INEN 867	%	0.02	N/D	3 Días	INEN 488	MPa	13.0 mín	18.07
Expansión de barra de mortero (8)	INEN 867	%	0.06	N/D	7 Días	INEN 488	MPa	20.0 mín	25.78
Resistencia a los Sulfatos. Expansión a 180 días	INEN 2503	%	0.10 máx	N/D	28 Días	INEN 488	MPa	25.0 mín	37.86
<b>REQUISITOS FÍSICOS: PUZOLANA</b>									
PARÁMETRO	MÉTODO	UNIDAD	INEN 490	RESULTADO					
Retenido en 45 µm (N° 325)	INEN 957	%	20 máx	11.25					
Índice de Actividad Puzolánica	INEN 490	%	75 mín	74					
<b>El cemento portland puzolánico Tipo IP CUMPLE con las especificaciones de la NTE INEN 490 para cemento hidráulico compuesto</b>									
Observaciones:									
* Los resultados de los análisis que se reportan corresponden al valor promedio obtenido en el periodo indicado, ensayado en muestras diarias de cemento despachado por la Planta Industrias Químicas del Azuay.									
* La resistencia a los 28 días corresponde al promedio del mes anterior.									
* (N/A) No aplica									
* (N/D) Resultado del ensayo para este periodo de producción no disponible									
									
Ing. Angélica García Moscoso									
Jefe de Control de Calidad									
Fecha de reporte: 10 de enero de 2015									



## ANEXO N°2

### FORMATO DE LAS HOJAS DE REGISTRO PARA LA GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS

Para llevar un registro de calidad y determinar las propiedades físicas de los áridos como su humedad, granulometría, peso específico, etc., tenemos los siguientes formatos de hojas:

CONTROL DE CALIDAD DEL AGREGADO GRUESO																																																																																																																														
CONTROL DE CALIDAD LABORATORIO HORICRETO																																																																																																																														
Lote: _____		Bodega: _____																																																																																																																												
Laboratoria: _____		Material: _____																																																																																																																												
Fecha: _____		Procedencia: _____																																																																																																																												
<b>HUMEDAD</b>	<b>PESO HUM</b>	<b>PESO SECO</b>	<b>CONT.AGUA</b>	<b>VALOR PROM</b>																																																																																																																										
<b>NTE INEN</b>																																																																																																																														
<b>862</b>																																																																																																																														
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO -ASTM C33																																																																																																																														
<b>Peso antes de lavado:</b>		<b>Peso inicial:</b>		<b>CURVA GRANULOMÉTRICA</b>																																																																																																																										
<b>Peso seco:</b>																																																																																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">TAMIZ</th> </tr> <tr> <th>No</th> <th>mm</th> <th>P.R. Acum</th> <th>% Ret parcial</th> <th>% Ret Acum</th> <th>% Pasa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1 3/4"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1 1/2"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1 1/4"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3/4"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1/2"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3/8"</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>No.4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>No.8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>No.16</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>No.30</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>No.50</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>No.100</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>No.200</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Pasa el No.200</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td><b>TOTAL</b></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>						TAMIZ						No	mm	P.R. Acum	% Ret parcial	% Ret Acum	% Pasa	3"						2"						1 3/4"						1 1/2"						1 1/4"						1"						3/4"						1/2"						3/8"						No.4						No.8						No.16						No.30						No.50						No.100						No.200						Pasa el No.200						<b>TOTAL</b>						
TAMIZ																																																																																																																														
No	mm	P.R. Acum	% Ret parcial	% Ret Acum	% Pasa																																																																																																																									
3"																																																																																																																														
2"																																																																																																																														
1 3/4"																																																																																																																														
1 1/2"																																																																																																																														
1 1/4"																																																																																																																														
1"																																																																																																																														
3/4"																																																																																																																														
1/2"																																																																																																																														
3/8"																																																																																																																														
No.4																																																																																																																														
No.8																																																																																																																														
No.16																																																																																																																														
No.30																																																																																																																														
No.50																																																																																																																														
No.100																																																																																																																														
No.200																																																																																																																														
Pasa el No.200																																																																																																																														
<b>TOTAL</b>																																																																																																																														
Peso Específico-ASTM C128																																																																																																																														
<b>Peso seco</b>		<b>Psss-Pmaterial en agua+Pcanastilla</b>			<b>Peso específico</b>																																																																																																																									
Absorción-ASTM C128																																																																																																																														
<b>Peso SSS</b>		<b>Peso Seco</b>			<b>Absorción %</b>																																																																																																																									
Peso Unitario o Volumétrico-STM C29																																																																																																																														
<b>Peso del Material en Kg</b>		<b>Volumen del recipiente en m3</b>			<b>P.V.S.S</b>																																																																																																																									
<b>Suelto:</b>					Kg/m <sup>3</sup> Kg/dm <sup>3</sup>																																																																																																																									
<b>Compactado:</b>					Kg/m <sup>3</sup> Kg/dm <sup>3</sup>																																																																																																																									

## ANEXO N°3

PRUEBAS DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN SECO A PARTIR DE DISEÑO EXPERIMENTAL						
	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
<b>PRUEB A # 1</b>	a/c:	0,55		1:	3 Días	76
	Agregado fino	997,46	377,826	7		75
	Agregado Grue.	738,91	289,769			75
	Agua	251,33	251,33	2:	7 Días	141
	Cemento	400	132,013	5		140
	Aditivo	Polimelaminas				140
	Observaciones:			3:	28 Días	223
						222
				7		230
<b>PRUEB A # 2</b>	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
	a/c:	0,48		1:	3 Días	90
	Agregado fino	991,12	375,424	4		89
	Agregado Grue.	738,91				91
	Agua	241,21	241,21	2:	7 Días	163
	Cemento	437,5	144,389	4		161
	Aditivo	Polimelaminas				161
	Observaciones:			3:	28 Días	247
						249
				6		248
<b>PRUEB A # 3</b>	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
	a/c:	0,55		1:	3 Días	100
	Agregado fino	991,12	375,424	10,5		98
	AgregadoGrue.	738,91	289,769			99
	Agua	251,21	251,21	2:	7 Días	177
	Cemento	400	132,013	9		175
	Aditivo	Policarboxilatos				178
	Observaciones:			3:	28 Días	270
						260
				8		253



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## PRUEBAS DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN SECO A PARTIR DE DISEÑO EXPERIMENTAL

REALIZADO POR: JesseniaJerves& Flavio Morocho Guaman

FECHA:

PRUEB A # 4	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:	0,48		1:	3 Días	107
	Agregado fino	997,46	377,826	3,5		102
	Agregado Grue.	738,91	289,769			100
	Agua	241,33	241,33	2:	7 Días	172
	Cemento	437,5	144,389	2		160
	Aditivo	Policarboxilatos				150
	Observaciones:			3:	28 Días	209
				4		240
			220			
PRUEB A # 5	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:	0,55		1:	3 Días	85
	Agregado fino	991,12	375,424	8		90
	Agregado Grue.	738,91	289,769			83
	Agua	251,21	251,21	2:	7 Días	167
	Cemento	400	132,013	9		172
	Aditivo	Polimelaminas				160
	Observaciones:			3:	28 Días	238
				6		240
			222			
PRUEB A # 6	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:	0,48		1:	3 Días	78
	Agregado fino	997,46	377,826	1		81
	Agregado Grue.	738,91	289,769			84
	Agua	241,33	241,33	2:	7 Días	126
	Cemento	437,5	144,389	2		129
	Aditivo	Polimelaminas				130
	Observaciones:			3:	28 Días	207
				3		215
			210			



## PRUEBAS DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN SECO A PARTIR DE DISEÑO EXPERIMENTAL

REALIZADO POR: JesseniaJerves & Flavio Morocho Guaman

FECHA:

PRUEBA # 7	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm³)	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm²)
	a/c:	0,55		1:  9	3 Días	101
	Agregado fino	997,46	377,826			95
	Agregado Grueso	738,91	289,769			96
	Agua	251,33	251,33	2:  9	7 Días	200
	Cemento	400	132,013			184
	Aditivo	Policarboxilatos				185
	Observaciones:			3:  8	28 Días	272
						249
			255			

PRUEBA # 8	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm³)	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm²)
	a/c:	0,48		1:  6	3 Días	103
	Agregado fino	991,12	375,424			102
	Agregado Grueso	738,91	289,769			101
	Agua	241,21	241,21	2:  5	7 Días	198
	Cemento	437,5	144,389			197
	Aditivo	Policarboxilatos				198
	Observaciones:			3:  6	28 Días	294
						270
			248			

## ANEXO N°4

PRUEBAS DE OPTIMIZACIÓN DE HORMIGÓN SECO A PARTIR DE DISEÑO EXPERIMENTAL						
PRUEBA # 1	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:	0,54		1:00		95
	Agregado fino	1054,1067	399,283			92
	Agregado Grue.	738,91	289,769	7	3 Días	94
	Agua	247,359761	247,359761	2:00		150
	Cemento	398,148148	131,402			156
	Aditivo	Policarboxilatos		8	7 Días	148
	Observaciones:			3:00		229
						240
PRUEBA # 2				5	28 Días	210
	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:	0,54		1:00		100
	Agregado fino	1012,424	383,494			103
	Agregado Grue.	738,91	289,769	9	3 Días	99
	Agua	246,60452	246,60452	2:00		168
	Cemento	398,148148	131,402			172
	Aditivo	Policarboxilatos		10	7 Días	169
	Observaciones:			3:00		270
						268
				8	28 Días	259

PRUEBAS DE OPTIMIZACIÓN DE HORMIGÓN SECO A PARTIR DE DISEÑO EXPERIMENTAL						
PRUEBA # 3	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:	0,53		1:00		100
	Agregado fino	1054,1067	399,283			98
	Agregado Grue.	738,91	289,769	6	3 Días	99
	Agua	242,359761	251,21	2:00		177
	Cemento	396,226415	130,768			175
	Aditivo	Policarboxilatos		5	7 Días	178
	Observaciones:			3:00		220
						230
				5	28 Días	238
PRUEBA # 4	Materia Prima	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Asentamiento	Ruptura	
					FECHA	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
	a/c:	0.53		1:00		107
	Agregado fino	1012,6967	383,597			102
	Agregado Grue.	738,91	289,769	8	3 Días	100
	Agua	241,609461	241,33	2:00		172
	Cemento	396,226415	130,768			160
	Aditivo	Policarboxilatos		7	7 Días	150
	Observaciones:			3:00		240
						250
				5	28 Días	237



## ANEXO N°5

### FOTOGRAFÍAS DE LA EXPERIMENTACIÓN:



AGREGADO GRUESO: CALIZA



AGREGADO FINO: ARENA



CILINDRO PEQUEÑO



ETIQUETADO DE LOS CILINDROS DE LA EXPERIMENTACIÓN.



DESMOLDE DE CILINDROS DE LA EXPERIMENTACIÓN



CURADO DEL HORMIGÓN



RUPTURA DE CILINDROS



## Bibliografía

1. **Guzman, Diego Sanchez de.** *Tecnología del Concreto y del Mortero*.
2. **Canovas, Manuel Fernandez.** *Hormigon*. 2007. pág. 8.
3. **Neville, AM.** *Properties of Concrete*. s.l. : Pearson Educational Ltd. .
4. **Wilson, A.** *Hormigón*. 1993.
5. **Humanos, Secretaria de Recursos.** *Manual de Concreto Parte II*.
6. **J., Ing. Alejandro Salazar.** *Síntesis de la Tecnología del Concreto*. 2009.
7. **Sobrado Maucaylle, Yohana.** *Concreto Translúcido*.
8. **Riesco, Jorge Galbiati.** *Diseño de Experimentos Factoriales con aplicaciones a Procesos Industriales*.
9. **Rius, J. Ferré y X.** "Introducción al diseño estadístico de experimentos," *Técnicas de Laboratorio*, vol. 24, No. 274, pp. Septiembre de 2002.
10. **CRUZ, Eduardo y RESTREPO, Correa y MEDINA, Pedro.** *Aplicación de un Modelo Factorial de Experimentación en un Ingenio Azucarero del Valle del Cauca*. . Diciembre de 2006. 32, pp 313-318.
11. **Cuatrecasas, L.** *Gestión integral de la calidad: Implantación, control y certificación*. s.l. : Ediciones Gestion 2000, S.A., 2001.
12. **Hidráulicos, Secretaría de Recursos.** *Manual de Concreto Parte 2*. México : s.n.
13. **Ronald E. Walpole, Raymond H. Myers, Sharon L. Myers.** *Probabilidad y Estadística*.
14. **Guzmán, Diago Sanchez De.** *Tecnología del Concreto y del Mortero*. 2001. 1.
15. **Walpole, Roland y Myers, Raymond y Ye, Keying.** *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 2002.